



TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS ESPACIO – TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ENCHARCAMIENTO. CASO DE ESTUDIO: UPZ CHICÓ LAGO

CAROLINA DUEÑAS BERROCAL

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D. C.

2021

TRABAJO DE GRADO

ANÁLISIS ESPACIO – TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE
BOGOTÁ PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR
ENCHARCAMIENTO. CASO DE ESTUDIO: UPZ CHICÓ LAGO

CAROLINA DUEÑAS BERROCAL

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Recursos
Hídricos

Docente

ANDRÉS CAMILO SALAZAR SÁNCHEZ
INGENIERO CIVIL Msc.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C.

2021



Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Católica de Colombia por abrir sus espacios educativos y acompañar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje y desarrollo profesional.

Agradezco al Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER por sus esfuerzos para generación del conocimiento en el Escenario de riesgo de inundación y por la transparencia y disposición de información obtenida de las redes de monitoreo y reportes de inundación.

Agradezco al profesor Andrés Salazar por su guía y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, su respeto, visión crítica y guía con los que contribuyeron en mi desarrollo personal y profesional en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 Introducción	8
2 Generalidades	10
2.1 Línea de Investigación	10
2.2 Planteamiento del Problema	10
2.2.1 Antecedentes del problema	10
2.2.2 Pregunta de investigación	12
2.2.3 Variables del problema	12
2.3 Justificación	13
3 Objetivos	19
3.1 Objetivo general	19
3.2 Objetivos específicos	19
4 Marcos de referencia	20
4.1 Marco conceptual	20
4.2 Marco geográfico	21
4.3 Estado del arte	23
5 Metodología	30
5.1 Recopilación y procesamiento de información	30
5.1.1 Estaciones de Medición	30
5.1.2 Información de Precipitación	32
5.1.3 Información de Inundaciones	35
5.1.4 Procesamiento de los eventos de lluvia	37
5.2 Análisis estadístico para la determinación de la relación de la precipitación con los eventos de inundación	37
6 Resultados y Discusión	41
7 Conclusiones y Recomendaciones	52
8 Bibliografía	53
9 ANEXO	57

LISTA DE FIGURAS

Pág.

FIGURA 1 CANTIDAD DE EVENTOS DE INUNDACIÓN REGISTRADOS EN EL PERIODO 2015 – 2019	14
FIGURA 2 AÑO DE INSTALACIÓN DE ESTACIONES DE LA RED DE MONITOREO DEL IDIGER VS ZONAS CON MAYORES REGISTROS DE INUNDACIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA, A PARTIR DE DATOS RECOLECTADOS DEL IDIGER)	16
FIGURA 3. MONITOREO DE LLUVIAS PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ (IDIGER, 2020).....	18
FIGURA 4 UBICACIÓN DE LA LOCALIDAD DE CHAPINERO Y UPZ CHICÓ LAGO.....	22
FIGURA 5 VARIACIÓN DEL TERRENO EN LA UPZ CHICÓ LAGO	23
FIGURA 6. ESTACIONES DE INFLUENCIA SOBRE LA UPZ CHICÓ LAGO.....	30
FIGURA 7. PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MULTIANUAL PARA LA ESTACIÓN COLEGIO FRANCISCO I.....	32
FIGURA 8. PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MULTIANUAL PARA LA ESTACIÓN CERRO CAZADORES	33
FIGURA 9. PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MULTIANUAL PARA LA ESTACIÓN UAN CIRCUNVALAR	33
FIGURA 10. PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MULTIANUAL PARA LA ESTACIÓN COL. GUSTAVO MORALES.....	34
FIGURA 11. REGISTRO DE EVENTOS DE INUNDACIÓN MENSUAL EN LA UPZ CHICÓ LAGO PARA EL PERIODO DE REGISTRO.....	36
FIGURA 12. REGISTRO DE EVENTOS DE INUNDACIÓN ANUAL EN LA UPZ CHICÓ LAGO PARA EL PERIODO DE REGISTRO	36
FIGURA 13. BETAS PARA LOS PARÁMETROS DE PROFUNDIDAD, INTENSIDAD, DURACIÓN Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	42
FIGURA 14. CURVA DE RIESGO DE SUPERVIVENCIA PARA PARÁMETROS DE PROFUNDIDAD Y DURACIÓN	43
FIGURA 15. CURVA DE RIESGO DE SUPERVIVENCIA PARA PARÁMETROS DE INTENSIDAD E ÍNDICE DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA	44
FIGURA 16. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA PARÁMETROS DE PROFUNDIDAD Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA ASOCIADOS A EVENTOS DE INUNDACIÓN.....	48
FIGURA 17. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA PARÁMETROS DE INTENSIDAD Y DURACIÓN ASOCIADOS A EVENTOS DE INUNDACIÓN	48
FIGURA 18 PROFUNDIDAD DE LOS EVENTOS DE LLUVIA PARA EL PERIODO DE REGISTRO SEGÚN SE REGISTRARON INUNDACIONES O NO.....	49
FIGURA 19 DURACIÓN DE LOS EVENTOS DE LLUVIA PARA EL PERIODO DE REGISTRO SEGÚN SE REGISTRARON INUNDACIONES O NO	49
FIGURA 20 INTENSIDAD DE LOS EVENTOS DE LLUVIA PARA EL PERIODO DE REGISTRO SEGÚN SE REGISTRARON INUNDACIONES O NO	50
FIGURA 21 ÍNDICE DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA PARA EL PERIODO DE REGISTRO SEGÚN SE REGISTRARON INUNDACIONES O NO	50

LISTA DE TABLAS

Pág.

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS MESES DE ONI. ADAPTADO DE (NOAA, 2021).....	39
---	----

1 INTRODUCCIÓN

En años recientes ha habido una creciente preocupación por los fenómenos asociados a Variabilidad Climática y Cambio Climático. Valores extremos asociados a temperatura y precipitación, entre otros, han obligado a las ciudades (desarrolladas en su mayoría mucho antes de que estos conceptos fueran considerados) a desarrollar medidas de adaptación ante estas condiciones y a evaluar el impacto de la toma de decisiones en la reacción de los mecanismos de socorro y la afectación sobre la población cuando se presentan periodos de sequía e inundaciones (Rojas, 2015) y (Saldarriaga *et al.*, 2020).

Ante esta necesidad se han tomado medidas para el monitoreo de las condiciones atmosféricas, así como el registro de información ante eventos ocurridos para mejorar el diagnóstico y respuesta ante estas situaciones. No obstante, durante la ocurrencia de eventos que generan afectación sobre los bienes y vida de la población, es importante obtener información rápida para la respuesta temprana (OMM, 2011).

Es así como se han desarrollado investigaciones que demuestran los esfuerzos en varias partes del mundo por generar conocimiento alrededor del fenómeno de inundación en las zonas urbanas que permita tener información para la toma de decisiones en materia de adaptación, prevención, mitigación y respuesta, tales como las realizadas por (Saldarriaga *et al.*, 2020), (Chen, 2010), (IWA/IAHR, 2017), (Ryan, 2018), (Wang, 2019) y (Breugem, 2020), entre otros.

Para afrontar esta situación, en la ciudad de Bogotá se tiene una red de monitoreo por parte de varias entidades que permite establecer en tiempo real la tendencia de los parámetros medidos, sin embargo, hasta el momento no ha sido posible establecer características definidas que relacionen la variación de estos parámetros con la ocurrencia de eventos de manera puntual en los sectores de la ciudad para la distribución de equipos de respuesta y atención de desastres.

Por lo anterior se desarrolla este proyecto, que pretende determinar la relación de las variables asociadas a la precipitación, como duración e intensidad, con los eventos de inundación ocurridos en la UPZ Chicó Lago, en la ciudad de Bogotá, bajo dos escenarios de variabilidad climática, los cuales serán utilizados como referentes para evidenciar la influencia de estas condiciones en la ocurrencia de estos eventos. Lo anterior contribuirá a la determinación de alertas tempranas en la zona de estudio y de igual forma, ser utilizados como línea base para estudios en otros sectores de la ciudad.

Como insumo para el análisis, se llevó a cabo una caracterización climatológica y del de drenaje en el sector, se identifica un sistema de alcantarillado antiguo y combinado, adicionalmente se resalta la cercanía de esta zona a los cerros

orientales lo cual indica una variación importante de las pendientes que influyen en los tiempos de concentración y la acumulación de volúmenes de agua en esta UPZ.

Adicionalmente, se encontraron varias aproximaciones para la determinación los parámetros que influyen en relación entre eventos de inundación y variables hidrometeorológicas (Mallakpour, 2017).

Para el análisis de eventos se utilizan los registros de lluvias a nivel minotal de las estaciones del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER con influencia en la UPZ Chicó Lago y los reportes de inundaciones o encharcamientos realizados ante dicha entidad para el mismo sector.

A partir de estos datos y mediante el uso de técnicas estadísticas se establecen bajo qué condiciones de duración e intensidad de precipitación se generan inundaciones en este sector. La evaluación se realiza para dos escenarios de variabilidad climática a través de los cuales se pretende incorporar las condiciones de humedad de suelo, lluvia antecedente y capacidad de los sistemas de alcantarillado.

Este documento cuenta con cuatro capítulos en los que se describen la problemática actual, motivación, objetivos, metodología, marco legal, geográfico y conceptual en los que se desarrolla el estudio, así como los resultados esperados

2 GENERALIDADES

2.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las limitaciones del sistema de alcantarillado de la capital de país, diseñado para condiciones significativamente diferentes a las actuales, en las que aumentaron las áreas impermeabilizadas, algunas incluso de forma irregular (El Tiempo, 2020), y se ha identificado la influencia de la Variabilidad Climática, con mayores intensidades de precipitación durante los meses de abril - mayo y octubre - noviembre, históricamente considerados como temporada de lluvias (Torres, 2019), han contribuido a la ocurrencia de eventos de inundación debido al encharcamiento, situación que deteriora la calidad de vida de los habitantes debido a la pérdida de enseres y daños a las viviendas que producen afectaciones económicas y, de otra parte, problemas de salud por la generación de enfermedades respiratorias y el aumento de los niveles de estrés como síntoma de afectación de la salud mental (Houston, 2011).

Ante esto, las entidades a nivel local han establecido planes y programas para la atención de la población, no obstante, los mecanismos de respuesta ante las emergencias están orientados a responder únicamente ante los reportes de los eventos, es decir cuando estos ya se han presentado. En este sentido, los tiempos de desplazamiento hasta el sitio de ocurrencia, representan minutos valiosos que pueden ser utilizados para dar alerta a la población y tomar medidas temporales para contrarrestar o minimizar los efectos del evento inminente mientras pasa el evento, tales como el transporte y puesta en funcionamiento de motobombas cuando el evento no ha alcanzado alturas que ocasionen daños en las viviendas y agilizar los protocolos de evaluación. De esta forma, conocer patrones como las profundidades o intensidades de precipitación calculadas de forma minutal durante la ocurrencia del mismo, podría permitir activar protocolos de respuesta antes de que el evento de lluvia genere una inundación.

De igual forma, la información suministrada de manera temprana también permite que las entidades encargadas establezcan protocolos que prioricen y mejoren la frecuencia del mantenimiento de las redes de servicios cuando no sea posible una reestructuración de los sistemas de drenaje debido a aspectos económicos y sociales.

2.2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

La gestión del riesgo de desastres en Colombia surge como una iniciativa del país

para conocer las condiciones de amenaza y vulnerabilidad en el territorio, determinar las medidas de reducción a implementar para reducir el riesgo de desastre y estar preparado ante eventos de emergencia, de tal forma que se pueda dar el apoyo necesario a las comunidades que se ven afectadas por eventos de diferente índole. La historia de la gestión del riesgo en el país es relativamente reciente, ya que inicialmente el país no tenía una política definida para saber cómo actuar ante las emergencias de origen natural que se generaban en el país. Fue solo hasta después del sismo de Popayán (Cauca) en 1983 que se creó el Fondo Nacional de Calamidades en el año 1984, posteriormente en 1985 cuando ocurrió la Avalancha de Armero (Tolima), el país identificó que no tenía la capacidad, ni la organización para atender eventos de este tipo, por lo que en el año 1988 se crea y organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.

Después de atender estas emergencias de gran impacto, el país identifica la necesidad de ordenar los territorios e identificar las zonas de alto riesgo, por lo que en año 1989 se dictan las primeras normas sobre planes de desarrollo municipal e Inventarios de zonas de alto riesgo y la reubicación de población en zonas de alto riesgo. En 1997 se crea la ley de Ordenamiento Territorial que insta a todos los municipios del país a que generen los Planes de Ordenamiento Territorial POTs, Después de esto el país vivió una serie de desastres entre los que se destacan el terremoto del Eje Cafetero en 1999, Las inundaciones del río Cauca y el río Sinú y el fenómeno de la Niña en los años 2010-2011. Hasta este punto el país se caracterizó por actuar de manera reactiva ante cualquier emergencia que se presentaba. Es por esto que en el año 2012, se crea la Ley 1523, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional De Gestión De Desastres. En esta ley se dicta que la responsabilidad en la gestión del riesgo es de todos los habitantes colombianos y se establece que la gestión del riesgo debe enmarcarse en los procesos de Conocimiento y Reducción del riesgo y el Manejo de los desastres. Finalmente, en el año 2014 se crea el decreto nacional 1807, mediante el cual se incorpora la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se establece que se debe incorporar el conocimiento de los fenómenos amenazantes de inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales en los POT. (Velandia, 2014).

Para el caso de Bogotá, en el marco de la ley 1523 de 2012, se creó el "Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático – SDGR-CC", el cual tiene como fin conocer, reducir y controlar los riesgos y los efectos del cambio climático en la ciudad, y manejar adecuadamente las situaciones de desastre, calamidad o emergencia que se puedan ocasionar. Dicho sistema Distrital es liderado por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) antes conocido como Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE).

Esta entidad, como parte del proceso de conocimiento del riesgo ha venido fortaleciendo el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático (SIRE), el cual tiene como finalidad administrar la información que se

genera en materia de riesgos en el territorio del Distrito Capital. De acuerdo con lo anterior, desde el año 2001, en este sistema se han venido registrando los eventos de inundación y encharcamiento que se han presentado en la ciudad, asimismo ha venido fortaleciendo a través del Sistema de Alerta de Bogotá (SAB) la red de estaciones hidrometeorológicas del IDIGER, la cual registra las lluvias que se presentan en diferentes sectores de la ciudad (IDIGER, 2019).

Es importante precisar que tanto la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) y el IDIGER han reconocido que gran parte de los encharcamientos e inundaciones que se presentan en la ciudad se deben a fallas funcionales en el sistema de alcantarillado de la ciudad. (IDIGER, 2018). No obstante, no existen análisis directos que permitan identificar en qué circunstancia se presentan las fallas en el sistema de alcantarillado pluvial de la ciudad. Dichos análisis son de importancia desde el punto de vista del conocimiento del riesgo tal como lo establece la política nacional de gestión de riesgo de desastres (UNGRD, 2019).

2.2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La pregunta de investigación que atañe este proyecto es ¿Cuáles son las características de los eventos de precipitación que dan lugar a los eventos de inundación registrados en los últimos cinco años en la UPZ Chicó Lago y cuál es la influencia de la variabilidad climática en estos eventos?

2.2.3 VARIABLES DEL PROBLEMA

El análisis que se pretende desarrollar en este proyecto involucra las siguientes variables:

Precipitación. Para este parámetro se considera la duración del evento, la cantidad de lluvia e intensidad del evento de acuerdo con los registros de las estaciones en la zona de estudio.

Se evalúan la ocurrencia o no de **encharcamientos** asociados a un evento de lluvia ocurrido en la fecha en la que este se presente, para la zona de estudio.

Finalmente, es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos en este proyecto pueden variar, si se presenta un cambio en alguno de los siguientes factores:

- Cambios en las condiciones del suelo (impermeabilización), esto se debe a que la ocurrencia o no de los eventos de inundación bajo precipitaciones extremas depende la capacidad de infiltración y la generación de escorrentía.

- Desempeño del sistema de drenaje, por lo tanto, al desarrollarse proyectos para la mejora de las redes de alcantarillado o para la incorporación de sistemas alternativos que permitan el control de los caudales pico (tales como los SUDS), claramente se modificará el efecto entre las precipitaciones y las inundaciones. Se aclara que aunque los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible pueden presentar soluciones a corto plazo, las limitaciones de espacio así como la falta de políticas públicas claras dificultan su implementación (Molina, 2016).
- Cambios en las condiciones de los sectores aledaños a la zona de estudio, los cuales están relacionados con el punto anterior y obedecen a los cambios en las condiciones fuera de la zona de interés, principalmente, el costado oriental debido a su cercanía a los cerros, por lo que, variaciones como una mayor impermeabilización empeorará la condición actual para la captación de la escorrentía.
- Mejoramiento de los sistemas de monitoreo y reporte, a futuro, los sistemas de monitoreo podrían ser complementados con mayor cantidad de estaciones y un mejoramiento en la recepción y almacenamiento de información. Asimismo, la complementación de los reportes de eventos de encharcamientos con datos más detallados como altura de inundación y áreas de afectación permitirán obtener resultados más detallados.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos años la ciudad de Bogotá ha experimentado fuertes inundaciones debido a altas intensidades y frecuencia de las precipitaciones. Los eventos conocidos a nivel nacional por el fenómeno de la niña durante el periodo 2010 – 2011 y más recientemente las ocurridas en 2018 – 2019 y lo que va corrido del 2020 a lo largo de todo el distrito capital, pero en particular en las localidades de Usaquén, Chapinero y Teusaquillo, que no solo presentan una importante cantidad de registros de eventos de inundación en los últimos 10 años, sino que presentan puntos críticos en términos impactos sobre la ciudad (IDIGER, 2020), muestran una alarmante situación que refleja la necesidad de mejoras estructurales en los sistemas de alcantarillado y respuestas más oportunas ante la ocurrencia de estos eventos.

De acuerdo con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB ESP (El Tiempo, 2018), varios de estos sectores de la ciudad se han ido redensificando, por lo que las redes de alcantarillado pluvial no cuentan actualmente con la capacidad suficiente para la captación y drenaje de la escorrentía generada. Esta situación acompañada de los cambios ocasionados por el ENSO que, en fase niña puede ocasionar un aumento considerable de las precipitaciones (IDEAM, 2018) indica que es fundamental la actuación desde diferentes frentes y etapas para contrarrestar los efectos de estos fenómenos.

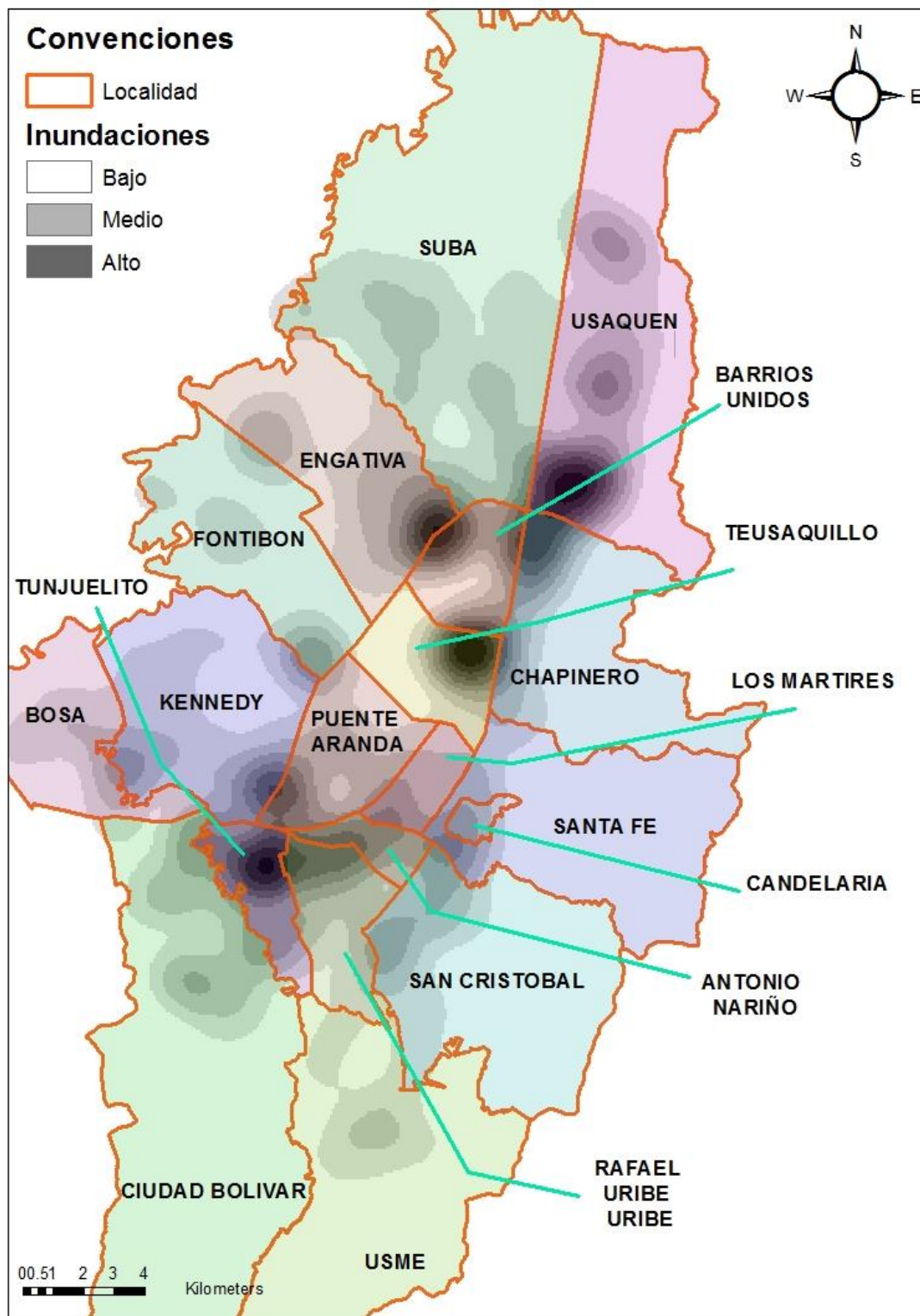


Figura 1 Cantidad de eventos de inundación registrados en el periodo 2015 – 2019
(Elaboración propia, a partir de datos recolectados del IDIGER)

Para esto, diferentes entidades como la EAAB ESP y el IDIGER han trabajado en la observación de parámetros como la precipitación mediante redes de monitoreo (Véase Figura 2) y han establecido planes de actuación durante la temporada de lluvias enfocados en los sectores que históricamente han presentado esta problemática, estableciendo programas de limpieza y mantenimiento, así como protocolos ante los eventos reportados por los ciudadanos (El Tiempo, 2018).

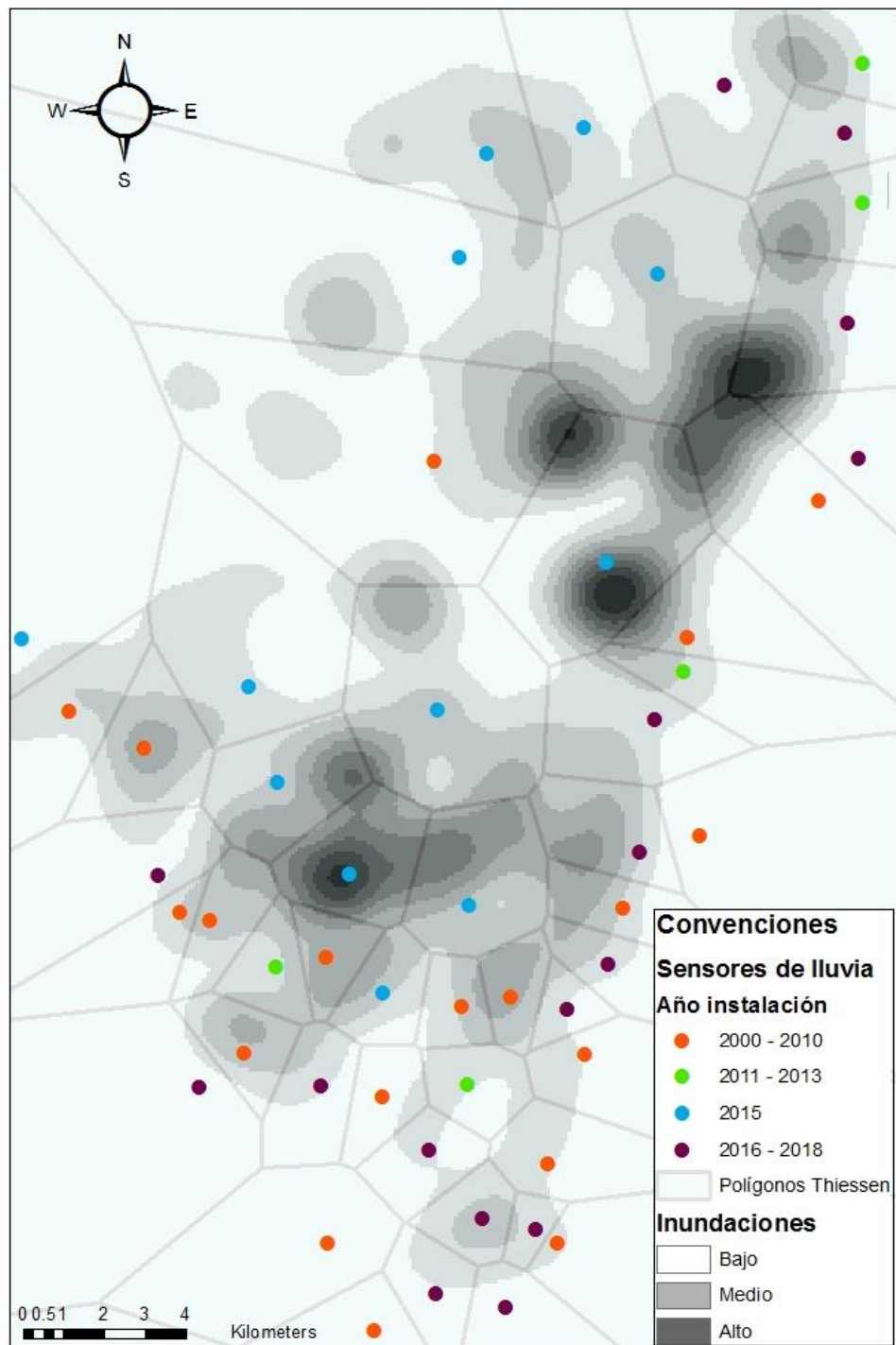


Figura 2 Año de instalación de estaciones de la red de monitoreo del IDIGER vs zonas con mayores registros de inundación. (Elaboración propia, a partir de datos recolectados del IDIGER)

No obstante, el monitoreo de estos parámetros se hace teniendo en cuenta únicamente cantidad de lluvia acumulada para cada estación y clasificándola según la cantidad de precipitación registrada (Véase Figura 3) por lo que no se establece

una relación entre la altura de precipitación y los eventos de inundación según los históricos reportados. Así, se desconocen otras características asociadas a estos eventos que podrían servir como factores determinantes para la atención de emergencias y permitir la puesta en funcionamiento de estos protocolos inclusive antes de que estos eventos generen afectaciones importantes sobre la población.

La identificación de las intensidades de lluvia, alturas de precipitación y duración del evento asociados a los eventos de inundación, permitirían establecer umbrales para la activación de los equipos de emergencia, así con el conocimiento de estos valores y los datos de precipitación minotal, es posible establecer minuto a minuto la intensidad de la lluvia y dado un valor determinado como umbral o límite, dar alerta a las comunidades, organismos de socorro y entidades para el transporte de maquinaria y personal requerido para la mitigación de los efectos del evento o evacuación de la población.

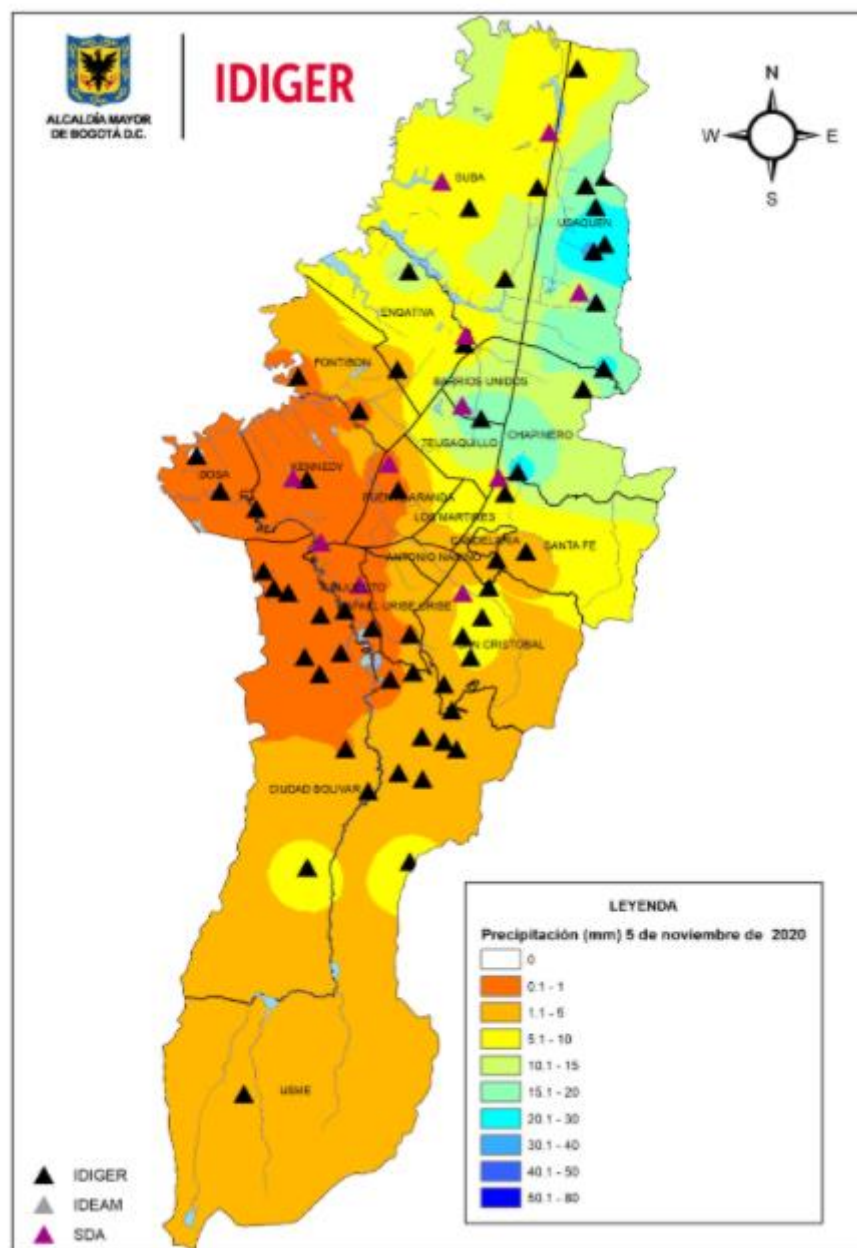


Figura 3. Monitoreo de lluvias para la ciudad de Bogotá (IDIGER, 2020)

Con lo anterior se evidencia la necesidad de un estudio que determine la relación entre características de los eventos de precipitaciones tales como duración, intensidad y profundidad de lluvia con los eventos de inundación reportados. Lo anterior, permitirá determinar, para este caso, cuáles son los parámetros determinantes en la ocurrencia de inundaciones, de esta forma se espera que los resultados obtenidos sirvan como herramienta de gestión y decisión para las distintas entidades responsables de la gestión del riesgo.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la relación entre eventos de lluvia y la ocurrencia de inundaciones en la UPZ Chicó lago de la ciudad de Bogotá, bajo escenarios de variabilidad climática.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Llevar a cabo una caracterización de la precipitación en la UPZ Chicó Lago.
- Realizar un análisis de las precipitaciones considerando diferentes escenarios de variabilidad climática y su relación con los eventos de inundación, a partir de los registros de la red hidrometeorológica del IDIGER y los reportes de encharcamientos e inundaciones registrados en el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático – SIRE, administrado por el IDIGER.
- Determinar las características de eventos de precipitación que dan lugar inundaciones en la zona de estudio.
- Establecer la influencia de la variabilidad climática en la ocurrencia de los eventos de inundación para la UPZ Chicó Lago.

4 MARCOS DE REFERENCIA

4.1 MARCO CONCEPTUAL

Los cambios en las variables climáticas que experimentamos a diario (temperatura y precipitación, entre otros) se encuentran dominados por fenómenos globales que presentan fluctuaciones alrededor de un valor medio en periodos mensuales, anuales y decadales, esto se conoce como variabilidad climática. Con el paso del tiempo se ha identificado que esta variación es cíclica y se origina por oscilaciones en la radiación solar. (IDEAM, 2018)

Es importante considerar que a pesar de ser procesos pertenecientes al sistema climático global, afectan de forma diferenciada las diferentes zonas del planeta debido al movimiento de este alrededor del sol y su elevación respecto al nivel del mar, es así como Colombia se ve altamente influenciada por el fenómeno ENSO - Oscilación del Sur EL Niño, el cual es un patrón climático representado en los cambios de temperatura sobre la parte central y oriental del Océano Pacífico.

Este fenómeno presenta dos fases, una fase cálida, denominada El niño en el que ocurre el aumento de la temperatura que a su vez afecta la velocidad y dirección de los vientos, manifestándose en Colombia con una disminución de las precipitaciones en la zona Andina y Caribe y un aumento en el resto del país. Por su parte, en la fase fría, denominada La Niña, ocurre una disminución de la temperatura promedio de la superficie del océano, ocasionando el efecto inverso que, en la fase descrita anteriormente, es decir, un aumento en la intensidad de las precipitaciones. Finalmente, también existe una fase denominada neutra en la que la variación respecto de la temperatura sobre el mar es mínima o nula (NOAA, 2020).

Adicionalmente, se ha evidenciado un desplazamiento del valor medio de temperatura respecto al cual se registran las anomalías, esto se conoce como Cambio Climático y se ha identificado la influencia de las actividades antrópicas en su ocurrencia. Estas variaciones afectan todos los demás fenómenos globales y locales, ocasionando un aumento en la ocurrencia y severidad de eventos climáticos extremos.

Ante esta situación, la comunidad científica y gobiernos han aunado esfuerzos para investigar este fenómeno y sus efectos, de esta forma, se pretende generar conocimiento que sirva como herramienta para la toma de decisiones a nivel internacional, nacional y local. En el caso de Colombia, esta información ha permitido el desarrollo de planes, programas y proyectos para la adaptación de las zonas urbanas y rurales a lo largo de todo el territorio ante los efectos de este fenómeno, tales como vendavales, deslizamientos, inundaciones e incendios forestales, entre otros.

En los años recientes, el país experimentó una emergencia invernal ocurrida durante los años 2010 – 2011 y que solo en la capital de país dejó aproximadamente mil personas afectadas debido a inundaciones por el desbordamiento de las corrientes de agua o el colapso de los sistemas de alcantarillado ante las altas intensidades de lluvia.

4.2 MARCO GEOGRÁFICO

Este proyecto se desarrolla en la UPZ 97 Chicó Lago, una de las 5 UPZs que conforman la localidad de Chapinero, ubicada al costado nororiental de la ciudad. Esta UPZ se encuentra ubicada en la zona nororiental de la localidad de Chapinero limitando al norte con la Av. Calle 100, al oriente con la Av. Cra. 7ma, al sur con la calle 67 y al occidente con la Av. Caracas, con una extensión aproximada de 442.4 Ha (Consejo Local de gestión del Riesgo y Cambio Climático, 2018).

La localidad de Chapinero, por su parte, se encuentra dentro la zona Urbana de Bogotá, sobre los cerros orientales, entre los 2600 msnm y 3550 msnm, cuenta con una temperatura promedio de 14.2 C y una precipitación anual que oscila entre 1000 y 1200 mm en los meses húmedos de abril, mayo, octubre y noviembre, siendo una de las localidades más lluviosas de la ciudad (IDIGER, 2019).

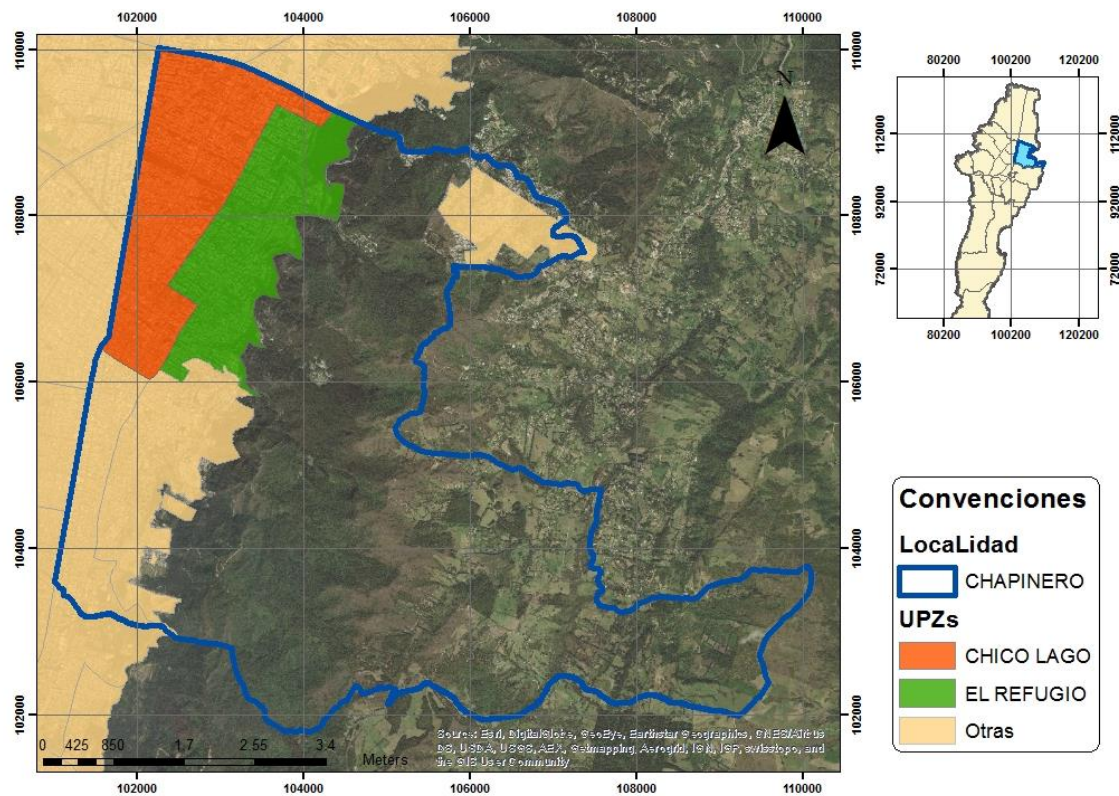


Figura 4 Ubicación de la Localidad de Chapinero y UPZ Chicó Lago

Las quebradas Las Delicias, Paraíso y Chulo son parte de la hidrografía del sector y son los responsables de transportar grandes volúmenes de agua durante los meses de lluvia, para los cuales se han presentado eventos de remoción en masa, inundaciones o encharcamientos y avenidas torrenciales.

Este sector cuenta además con dos zonas geomorfológicas que presentan una variación importante de pendientes, teniendo en la parte más oriental correspondiente a los cerros, donde se ubica entre otras, la UPZ El Refugio, y cambiando drásticamente hacia el occidente, donde éstas se reducen, lo que propicia la ocurrencia de eventos de inundación, por la acumulación de aguas en estas zonas, como es el caso de la UPZ Chicó Lago.

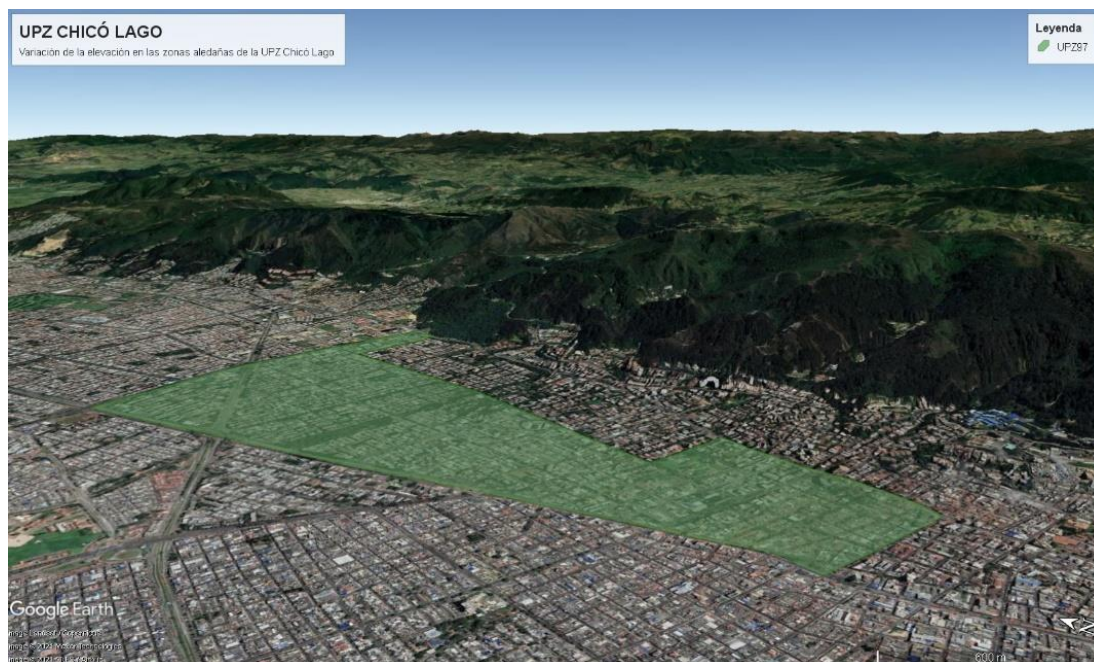


Figura 5 Variación del terreno en la UPZ Chicó Lago

4.3 ESTADO DEL ARTE

Los problemas por encharcamiento en las zonas urbanas no son ajenos a las grandes ciudades y se han venido presentando a lo largo de las últimas décadas, por ello, desde diferentes sectores se ha analizado esta problemática con el fin de mejorar sobre el conocimiento que se tiene sobre la misma y servir de insumo para la toma de decisiones desde la planeación, prevención y respuesta (Sörensen *et al.*, 2017) y (Saldarriaga *et al.*, 2020).

Aunque la mayoría de los análisis se han identificación y delimitación de las zonas de amenaza mediante modelos de transporte de fluidos a lo largo de una cuenca, en muchas ocasiones, estas aproximaciones presentan importantes limitaciones debido a que es necesario conocer detalladamente las características de la zona de estudio tales como topografía, tipos de suelo y funcionamiento y estado actual de los sistemas de alcantarillado. Siendo este último uno de los factores que más generan incertidumbre debido a los cambios que a través de los años han sufrido y a la necesidad de fuertes cantidades de inversión para su mejora (Gaitan, 2016).

Sumado a lo anterior, aunque estos modelos pueden dar una visión clara de las zonas vulnerables, los organismos de socorro deben estar estratégicamente dispuestos para la atención durante la ocurrencia de estos eventos en la temporada de lluvias, atendiendo una vez se realicen los reportes. En este punto se desaprovecha una gran oportunidad para determinar en el momento de las precipitaciones, realizar los desplazamientos hacia las zonas potencialmente

afectadas.

Por ello, se ha buscado la manera de establecer relaciones directas entre la precipitación y la ocurrencia de fenómenos de encharcamiento e inundaciones con el fin de entregar información clara y concisa para que, a través del monitoreo de las estaciones de lluvia en tiempo real, sea posible tomar medidas antes de que estos fenómenos se presenten.

De esta forma, se destacan estudios relacionados como el titulado: Rainstorm height and floodings effect analysis as a tool for pluvial flood emergency management (Di Salvo, 2014), En este proyecto, llevado a cabo en la ciudad de Roma, Italia, se analizaron las alturas de precipitación y su efecto en la ocurrencia de inundaciones. De esta forma, se buscó la individualización de la altura crítica para llenar las depresiones y originar una inundación.

Para alcanzar este objetivo, se recopilaron datos de reportes de inundaciones ocasionadas por eventos extremos de precipitación realizados ante los organismos de socorro y complementado por los reportajes realizados por los medios de comunicación locales. Esta información contiene las coordenadas, área, fecha de ocurrencia y dirección. Aunque los registros no involucran las áreas de inundación el estudio definió áreas de inundación a partir de la definición de las áreas de influencia de los reportes.

Por otra parte, los datos de lluvias se recopilaron a escala subhoraria a partir de los registros de 51 estaciones pluviográficas proporcionadas por el instituto Hidrográfico y Mareográfico Regione Lazio. A partir de esta información, se seleccionaron eventos con intensidades superiores a los 20 mm/h para un periodo de 2001 a 2014. Para cada tormenta se extrajeron las alturas máximas de precipitación en 30 minutos, 1 hora, 2 horas y 3 horas. En este proceso se identificaron dos tendencias, en la primera, denominada A, los eventos presentaron un solo pico en un periodo de 1 a 3 horas, mientras que en la segunda, denominada B, se presentaron picos intermitentes en las últimas 24 a 60 horas.

Para el área de estudio se realizó un análisis topográfico del que se obtuvo un modelo digital de terreno a una resolución de 2X2m para el que se identificaron las áreas ubicadas en depresiones de la ciudad, dado que son las zonas más susceptibles de inundación. Posteriormente, las áreas predefinidas se filtraron mediante la definición de un umbral de área y profundidad mínima. De esta forma, se seleccionaron aquellas zonas con un volumen mayor a 0.1 m³. Adicionalmente, para simular las áreas de inundación, se aplicó un buffer de 100m alrededor de cada punto.

De lo anterior se obtuvieron archivos tipo shape de las depresiones y las zonas con reportes de inundación, que fueron agrupadas para representar las áreas más susceptibles. Las áreas resultantes se cruzaron geográficamente con cada una de

las cuencas hidrográficas definidas con el fin de considerar la contribución de las lluvias de cada estación a las mismas y su efecto sobre los eventos de inundación. Luego, los eventos de inundación registrados se asociaron a cada cuenca para establecer la relación entre la precipitación y los eventos de encharcamiento.

A partir del análisis realizado se determinaron las lluvias críticas y no críticas para la ocurrencia de inundaciones y las características asociadas a las mismas. De esta forma se identificaron dos alturas críticas de precipitación, una para cada tendencia. Se estableció que la altura crítica para la tendencia A es mayor que la altura crítica para la tendencia B de lluvia.

Finalmente, se llevó a cabo una evaluación de vulnerabilidad para identificar, en las zonas ya definidas como propensas a las inundaciones, aquella infraestructura, redes y demás inmuebles que pueden verse afectados debido a estos eventos.

Otra aproximación para examinar la relación entre las precipitaciones y las inundaciones fue la desarrollada por Mallakpour en 2017 titulada: *On the use of Cox regression to examine the temporal clustering of flooding and heavy precipitation across the central United States*.

En esta investigación se determinó la relación temporal entre la precipitación e inundaciones y la influencia de la Variabilidad Climática en estos a partir del análisis de dos índices. Para este caso, se analizó la ocurrencia de estos eventos a una escala sub-estacional, alrededor del centro de los Estados Unidos que, de acuerdo con el estudio, ha sufrido durante décadas por fenómenos de inundación importantes.

Para el desarrollo del estudio se recopilaron datos de precipitación diaria de la National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, para un periodo de registro de 60 años (1950 - 2012), con una resolución de 0.25 Grados. A partir de esta información, se identificaron los eventos de precipitación extremos con base en el cálculo del percentil 95 de la distribución empírica de la precipitación en cada pixel.

Las inundaciones, por su parte, se obtuvieron a partir de los registros diarios recolectados por la United States Geological Survey - USGS. Los eventos de inundación se seleccionaron utilizando como parámetro un promedio de 2 inundaciones por año y mínimo un evento cada 15 días, con el fin de no contar la misma inundación varias veces. Para identificar la ocurrencia de estos eventos, se asignaron a cada celda, valores de 1 para la ocurrencia del evento y 0 para la no ocurrencia.

Finalmente, se seleccionaron dos índices climáticos el índice Oscilación del Ártico (AO, por sus siglas en inglés), que describe los cambios de presión atmosférica sobre el ártico y las regiones cercanas, y condiciona variación de lluvia y

temperatura en el centro de los Estados Unidos, y el patrón del Pacífico-Norteamérica (PNA), que representa los flujos de vientos sobre el hemisferio norte y tiene una gran influencia sobre el centro de los Estados Unidos. Los valores diarios de estos parámetros fueron extraídos del Centro de Predicción Climática de la NOAA (CPC).

Se utilizó el modelo de regresión de Cox para simular la ocurrencia o no, de eventos de precipitación e inundación, utilizando como covariables temporales los índices climáticos descritos anteriormente. Este modelo fue seleccionado debido a que permite determinar la posible presencia de un clúster temporal entre las variables analizadas, así dependiendo de una tasa de ocurrencia variable en el tiempo, se puede esperar que un evento sea seguido por otro evento adicional.

Para examinar las fuerzas climáticas que son responsables de los cambios en la frecuencia de los eventos de inundación y precipitación a escala estacional se utilizó un proceso Poisson con una tasa de ocurrencia variable estacionalmente. Más adelante se analizaron un conjunto de modelos involucrando los índices de variabilidad climática seleccionados, así: 1. un modelo que no incorpora ningún índice climático, 2. un modelo con solo AO como covariable 3. un modelo con solo PNA como predictor. 4. Un modelo que incluye tanto AO como PNA y la interacción entre ellos. Estos modelos fueron evaluados según el menor valor obtenido para el método de criterio de información de Akaike.

Los resultados obtenidos muestran que existe una relación negativa entre el patrón PNA y la ocurrencia de eventos de inundación sobre la zona oriental de la región en estudio. Esto indica que en general, valores menores de PNA existe un incremento en la tasa de ocurrencia de las inundaciones. Por otro lado, sobre el costado occidental de la región en estudio se observó una relación positiva, así, con un aumento del índice PNA hay un incremento en la tasa de ocurrencia de los eventos de inundación. De igual forma ocurre con los eventos de precipitación.

Por otra parte, para el caso del índice AO, se identificó una relación positiva entre este y la ocurrencia de eventos de inundación, concentrada principalmente en la zona suroriental de la región en estudio. Para el caso de la precipitación, se encontró una relación positiva y la ocurrencia de eventos extremos de precipitación en el costado oriental de la región objeto de análisis, mientras que sucede el proceso inverso para el costado occidental de la misma.

Posteriormente se evaluó ambos índices, AO y PNA, como covariables, con el fin de determinar si uno de ellos domina sobre el otro, obteniendo como resultado que la ocurrencia de eventos de precipitación extremos e inundación dependen de forma lineal de los índices AO y/o PNA sobre la mayor parte del centro de los Estados Unidos. Se determinó también que el patrón PNA corresponde al índice predominante, puesto que describe la ocurrencia de inundación y lluvias extremas en la mayor parte del área en estudio.

Más recientemente, Wan Mohtar et al, realizaron durante el 2020 una investigación denominada Urban flash flood index based on historical rainfall events, en la que se establece un índice de crecientes súbitas urbanas con base en históricos de precipitación en la ciudad de Kuala Lumpur, Malasia, que hace parte de la cuenca del río Klang y se caracteriza por tener dos temporadas monzónicas a lo largo del año con una precipitación anual de 2600 mm, lo que la ha hecho propensa a inundaciones. Con esto se pretende detectar aquellas zonas que requieren una intervención prioritaria de los sistemas de drenaje.

Los datos utilizados se obtuvieron a partir del registro de inundaciones recolectado por el departamento de irrigación y drenaje (DID) en un periodo de 2003 a 2015, así, se recopiló información de la fecha y localización, frecuencia, profundidad, área y causa del evento. Adicionalmente, se recolectaron datos de intensidad y duración de la lluvia para las fechas de ocurrencia de las inundaciones

A partir de esta información se realizaron análisis en los que se clasificaron las inundaciones según su profundidad, los meses según la frecuencia de ocurrencia de estos eventos y, de igual forma, se clasificó la precipitación según su duración y profundidad.

Se definió el Índice de Susceptibilidad a la Inundación (FS, por sus siglas en inglés), según la frecuencia de las inundaciones en cada área o ubicación definida en el periodo de estudio, utilizando una escala de likert para su clasificación, siendo 1, marginalmente susceptible y 5, extremadamente susceptible.

Posteriormente, se calculó el Índice de Vulnerabilidad a la Inundación (FVI, por sus siglas en inglés), que se calcula a partir de las sumatorias de los puntajes de duración, mes de ocurrencia y profundidad de la lluvia. Los resultados se categorizan en escala de Likert siendo 1 poco vulnerable y 5 extremadamente vulnerable.

Adicionalmente, se analizó el impacto socioeconómico de estos eventos a partir de la relación de las profundidades de inundación y los daños ocasionados, teniendo como parámetros adicionales los usos del suelo, topografía y diseño de drenaje. Para esto, se definió un Índice de Impacto Socioeconómico (SI, por sus siglas en inglés), en el que también se utilizó la escala Likert con el fin de clasificar las profundidades de inundación, considerando las zonas donde se genera, puesto que, para áreas comerciales, incluso las alturas de inundación más pequeñas pueden generar pérdidas económicas debido a que las personas no se acercarán a los locales.

A partir de los índices calculados se determinó el índice de crecientes súbitas (FFI, Flash Flood Index) como el promedio aritmético de los índices anteriormente definidos.

Para verificar los valores resultantes, se utilizó un modelo hidrológico - hidráulico en 2D denominado TREX, que es comúnmente utilizado para la simulación de precipitación y escorrentía superficial. Para este caso de estudio, se despreciaron la infiltración y la evapotranspiración, dado que se trata del análisis de eventos extremos. De esta forma, se simuló la descarga y tiempo al pico en 3 cuencas, seleccionadas por la disponibilidad de datos. La calibración y validación del modelo se lleva a cabo para el mes de abril de 2008, a partir del análisis de RPD, Relative Percentage Difference, para lo cual se obtuvieron valores aceptables que indican la habilidad del software para la modelación de caudales.

Finalmente, se llevó a cabo la una simulación a partir de la distribución de profundidades de lluvia para 50 y 100 años. Se tuvo en cuenta que las intensidades altas en tiempos cortos son las causantes de la inundación. Como resultado, se determinaron los sitios propensos a las inundaciones en toda la ciudad, de acuerdo con su impacto, según los valores de los índices propuestos.

Se concluye que los índices definidos para la determinación de las zonas propensas a inundación corresponden adecuadamente según los resultados de las simulaciones utilizadas para la verificación de estos. No obstante la utilización de récords históricos en sitios puntuales para la identificación de zonas propensas a inundaciones es preciso, las limitaciones de esta metodología están validada por la distribución de las inundaciones como se evidenció en este estudio.

La clasificación utilizada para la susceptibilidad, vulnerabilidad e impactos económicos permite tener una visión completa de las áreas críticas e identificar los sitios no detectados. Finalmente, los mapas a partir de la escala de colores propuesta, les permiten a las autoridades locales tener una visión que facilite la puesta en marcha planes, programas y proyectos enfocados en la mitigación.

En Colombia, país no ajeno a esta problemática, se han realizado análisis similares en la búsqueda de establecer una relación entre las precipitaciones y las inundaciones por encharcamiento. Se destaca de estos estudios el denominado Desarrollo de una metodología para el estudio de las inundaciones causadas por encharcamiento de agua de lluvia en zonas urbanas relativamente planas. Área de estudio: Montería (Colombia). (Padilla, 2015)

En esta investigación se desarrolló una metodología para determinar la influencia de las precipitaciones en la ocurrencia de eventos de encharcamiento utilizando como caso de estudio la zona urbana de la ciudad de Montería, Colombia. Caracterizada por ser una zona plana (pendientes entre el 1% y el 3%) y por un pobre sistema de alcantarillado pluvial para la captación de la escorrentía sobre las vías de la ciudad, por lo que la generación de escorrentía dependerá de la capacidad de infiltración del suelo.

Se utilizó información de seis estaciones del IDEAM con influencia en la zona y periodo de registro de 21 años (1980 - 2000). De otra parte, se determinó la capacidad de retención de los suelos a través de mediciones de infiltración en función del tiempo para los meses de octubre y noviembre de 2005. De esta forma, se obtuvo el exceso de agua que permanece sobre el suelo como la relación entre la precipitación y la lámina de agua en el punto de saturación de suelo, teniendo como resultado el exceso que causa la inundación.

Esta información fue contrastada con históricos de reportes de inundación realizados por un medio regional tradicional para cada una de las estaciones desde el año de 1995 (Año de fundación del periódico). Posteriormente se llevaron a cabo análisis de regresión entre la precipitación e inundaciones en cada estación para determinar la magnitud de los encharcamientos y finalmente, se generaron mapas de susceptibilidad y vulnerabilidad en la zona de estudio.

Se obtuvo como resultado una relación entre la capacidad de infiltración y el tipo y subtipo de suelo. No obstante, se aclara que gran parte del suelo de la zona urbana se encuentra impermeabilizado, por lo que la capacidad de infiltración es prácticamente nula, esto sumado a un inadecuado sistema de alcantarillado pluvial es el responsable de la ocurrencia de estos eventos donde las pocas zonas no urbanizadas son las responsables de la infiltración. Los valores calculados fueron comparados con los eventos de inundación reportados en el periódico El Meridiano de Córdoba, con lo cual se corroboró que aquellos eventos para los cuales se determinó un exceso de lluvia asociado un reporte de encharcamiento.

Adicionalmente, se hicieron análisis de regresión estadística con lo que se estableció una relación directa entre el exceso de lluvia y los encharcamientos en cada una de las estaciones, además se estableció la magnitud de inundación para cada tipo de suelo, concluyendo que la ocurrencia de eventos depende de la intensidad y magnitud de agua precipitada.

Finalmente, se clasificó la susceptibilidad a las inundaciones según la capacidad de infiltración de cada una de las clases de suelo para las comunas, con lo que se determinó la vulnerabilidad de las poblaciones, para las que se estableció una capacidad de respuesta y adaptación en función de las condiciones socioeconómicas, así, las poblaciones de menores ingresos presentan mayor dificultad para afrontar las situaciones de desastre.

5 METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se describe detalladamente la metodología adoptada para la recopilación, procesamiento, análisis de información y obtención de resultados.

5.1 RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

5.1.1 ESTACIONES DE MEDICIÓN

En esta etapa se llevó a cabo la recopilación de datos de los eventos de precipitación de las estaciones de la red hidrometeorológica del IDIGER que cuentan con influencia en la UPZ Chicó Lago, estas son Cerro Cazadores, Colegio Gustavo Morales, Colegio Francisco I (Véase Figura 6).

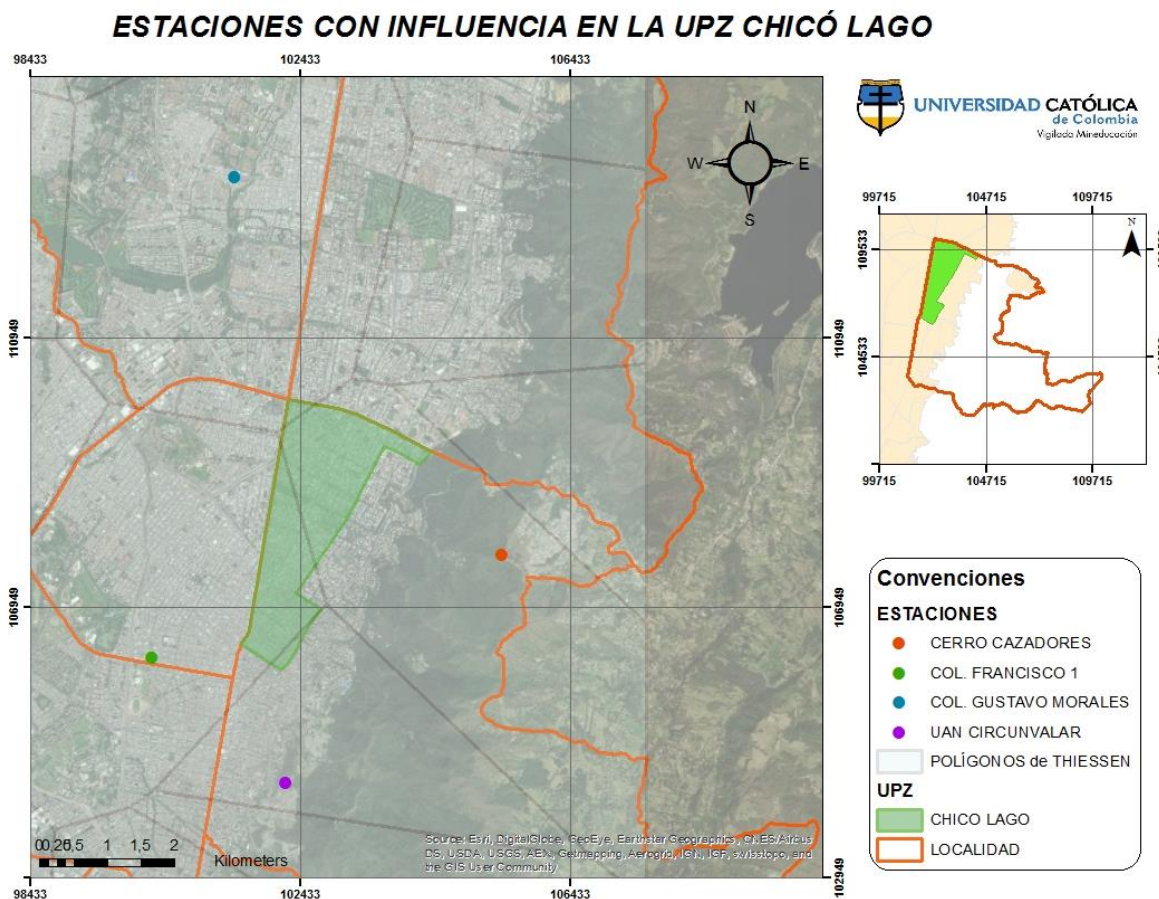


Figura 6. Estaciones de influencia sobre la UPZ Chicó Lago

Se realizó la recolección de profundidades de precipitación minutal (es importante precisar que las estaciones analizadas presentan registros cada 5 minutos en los

dos primeros años del periodo de registro) para cada una de las estaciones con influencia en el área de estudio y para todo el periodo de registro (2016 – 2020). Posteriormente, se realizó una revisión de los datos recolectados y se identificó que para ciertos periodos de tiempo, una o varias estaciones no registran información, en estos casos se recalcularon los polígonos de Thiessen con el fin de obtener los pesos de las estaciones en cada una de las condiciones, es decir, en función de la disponibilidad de información se realizaron análisis para todas las estaciones, 3 estaciones y dos estaciones. Para los casos en los que se tuvo únicamente datos de una sola estación, se utilizaron los registros de los eventos de esta para el análisis.

Es importante precisar que las estaciones del IDIGER hacen parte del Sistema de Alerta de Bogotá (SAB), mediante el cual se realiza un monitoreo en tiempo real de las condiciones atmosféricas de la ciudad, registrándose variables como precipitación, temperatura, niveles de cauces, entre otros. Dicho monitoreo se realiza de manera continua a escala minutal durante los 365 días del año, las 24 horas del día (IDIGER, 2021). En este sentido, corresponde a información detallada que permitirá tener disponibles datos a nivel de eventos de lluvia, los cuales son de gran utilidad para el tipo de análisis que se requiere realizar con este trabajo. Asimismo, esta información es de libre acceso y consulta para la ciudadanía. No obstante, la información disponible tiene ciertas limitaciones que en algunos casos no permite contar con registros completos para los análisis que se pretenden llevar a cabo en este proyecto. Entre las principales limitaciones, se encuentran:

- En algunos periodos, los registros de precipitación no son continuos, puesto que por encontrarse a la intemperie, las estaciones están expuestas a las condiciones atmosféricas del momento como lluvias extremas, vientos fuertes, entre otros, que pueden ocasionar daños a la red e impiden que la información sea remitida hacia los servidores del IDIGER, donde se almacena la información.
- En algunas ocasiones pueden no existir registros de datos para algunos periodos de tiempo, debido a mantenimientos periódicos que se realizan a las estaciones.
- Para que exista disponibilidad de registros de las estaciones es necesario que se desarrollen varias etapas, en las que se depende de equipos de transmisión y almacenamiento. Las fallas en algunos de los equipos de estos sistemas pueden ocasionar que se pierdan datos ocasionando la falta de registros continuos.

Para los casos anteriormente mencionados (IDIGER, 2018), no es posible realizar los análisis respecto a los eventos de encharcamientos y su posible asociación con eventos de lluvia por no contar con información disponible.

5.1.2 INFORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN

Se analizaron las estaciones listadas anteriormente y se determinó que todas cuentan con régimen bimodal, con periodo húmedo los meses de Marzo, Abril y Mayo para la primera mitad del año y Noviembre para la segunda mitad del año, según la información obtenida del IDIGER. Tal como se muestra a continuación.

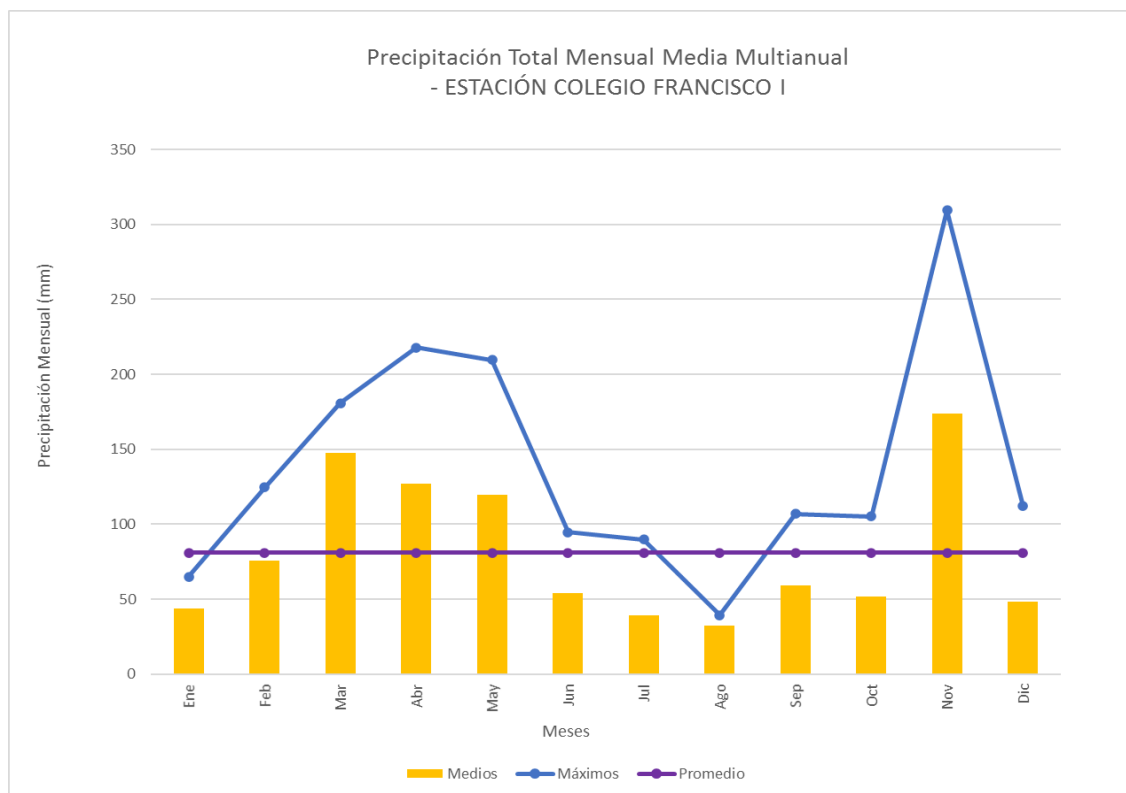


Figura 7. Precipitación total media multianual para la Estación Colegio Francisco I

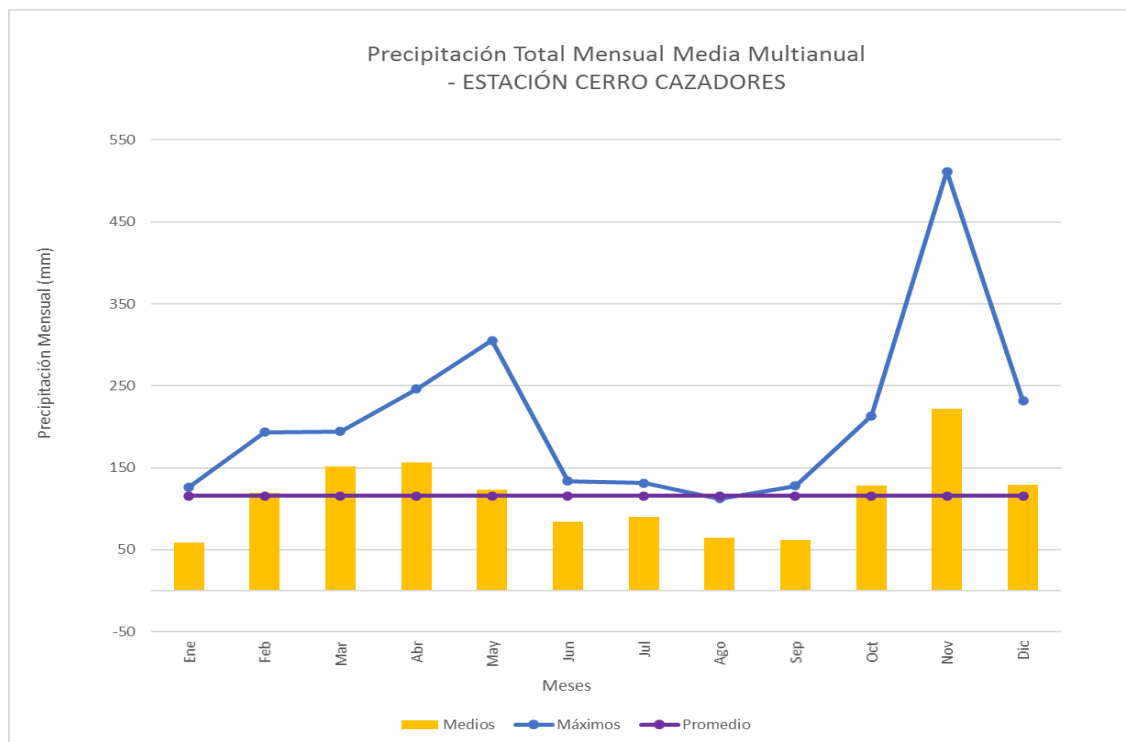


Figura 8. Precipitación total media multianual para la Estación Cerro Cazadores

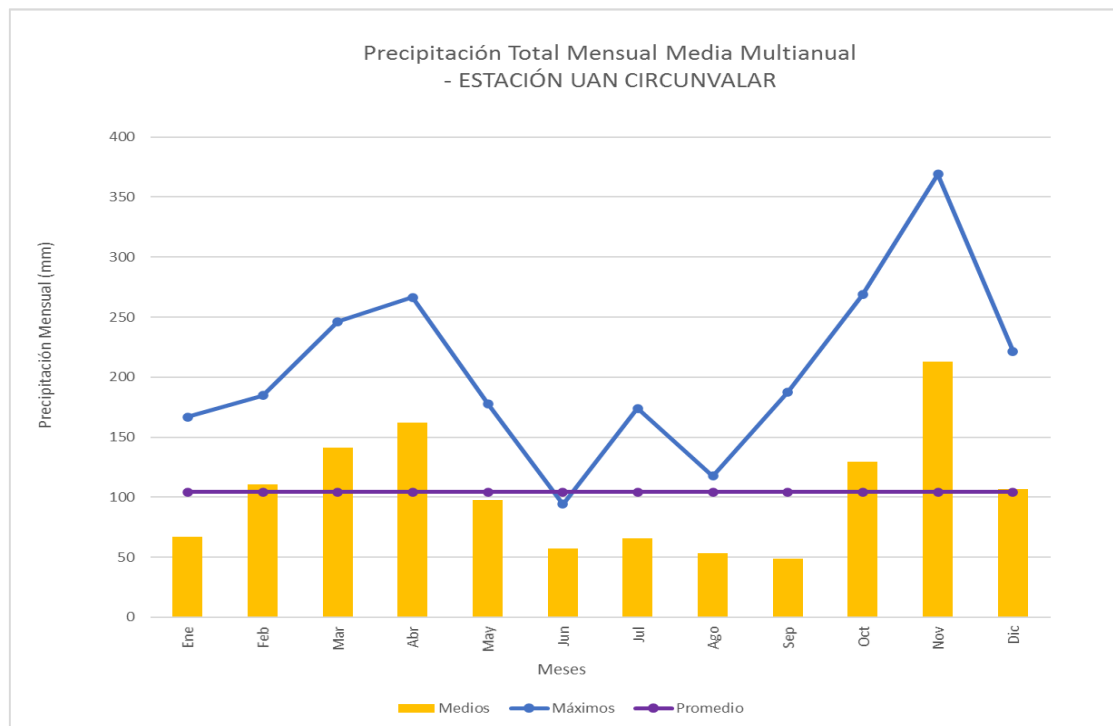


Figura 9. Precipitación total media multianual para la Estación UAN Circunvalar

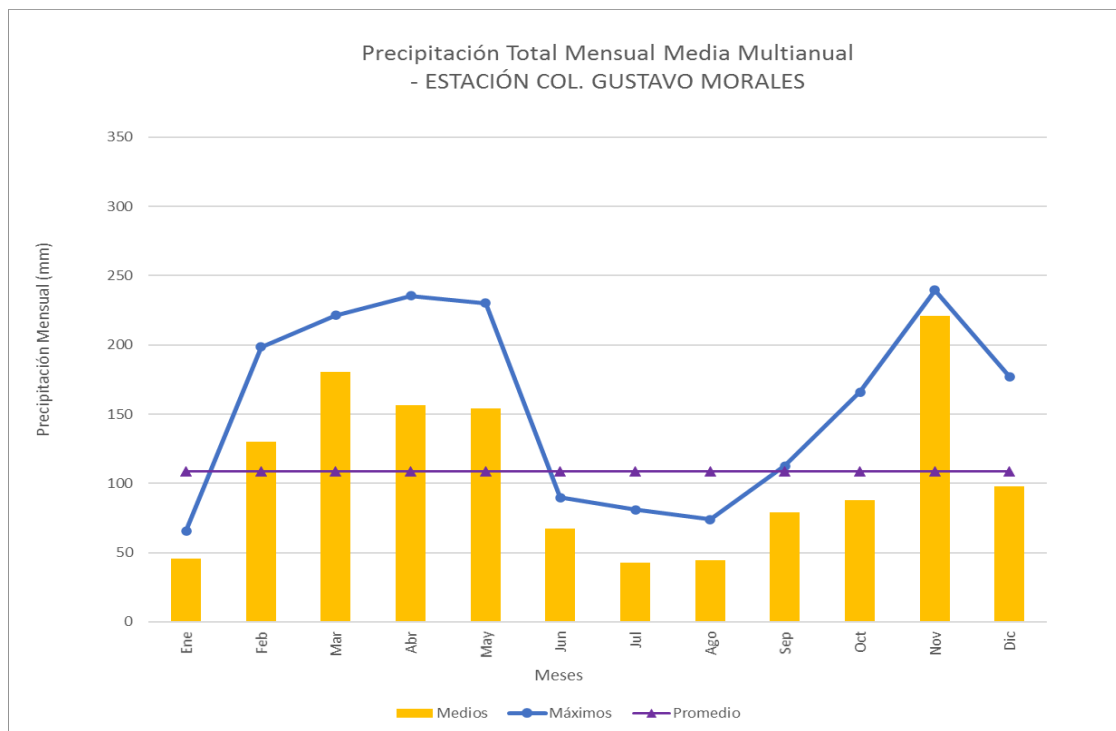


Figura 10. Precipitación total media multianual para la Estación Col. Gustavo Morales

Para los casos en los que se encontró faltantes de datos en los que se presentó un evento de precipitación, no se incluyeron estos registros por considerar que no se tiene información completa y los datos utilizados pueden afectar los resultados del análisis. No se evaluó la complementación de datos por tratarse de eventos de precipitación puntuales, en los que depende de las características del viento, nubosidad, entre otros para determinar la magnitud de la lluvia. En esta circunstancia se analizaron las precipitaciones considerando la influencia de las demás estaciones, es decir, se trazaron los polígonos de Thiessen asumiendo que la estación con datos faltantes no existe o no se encuentra en funcionamiento.

Para la información obtenida de cada una de las estaciones con influencia en la UPZ en estudio se evidenciaron datos atípicos, se realizó una revisión de la relación de estos datos con los eventos de inundación, con el fin de determinar si es posible que estos correspondan a eventos extremos que hayan provocado encharcamientos de gran magnitud en el sector, así mismo se revisaron los reportes realizados por los medios de comunicación en dichas fechas para el sector. Sin embargo, en los casos en que los eventos no estaban asociados con inundaciones se determinó no utilizar la información emitida por las estaciones para la fecha en que se detectaron los datos atípicos. De esta manera se garantiza que no se utilice información que pueda sesgar los resultados obtenidos.

5.1.3 INFORMACIÓN DE INUNDACIONES

Para la obtención de información de los eventos de inundación registrados en la ciudad de Bogotá, se solicitó a través del aplicativo disponible en la página web de la entidad (IDIGER), los datos disponibles de los eventos de emergencia asociados a inundación para el periodo de registro del cual se tuviera disponibilidad en el mencionado Instituto, asimismo, se solicitó que en lo posible, dichos registros de eventos se facilitara con la ubicación del respectivo evento (coordenadas), con el fin de que fuera más fácil su localización espacial. La solicitud fue atendida por la entidad, quien mediante un enlace habilitado para descarga de información, remitió una base de datos en la que se compilaba la información de eventos de emergencia asociados a inundación, la cual, según se informó corresponde a registros del Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático (SIRE). La información suministrada consta de reportes asociados a inundación para la ciudad en el periodo 2001 – 2020. Los reportes se encuentran clasificados por localidad, barrio, UPZ y dirección, adicionalmente, solo para los últimos años (que incluye el periodo de análisis de este proyecto), se cuenta con las coordenadas del reporte del evento.

Adicionalmente, cada uno de los eventos se encuentran clasificados según si corresponden a caída de granizo, desbordamientos y encharcamientos. Lo cual permitió descartar aquellos eventos que son de origen fluvial.

Para la selección de los eventos se filtraron los datos obtenidos según el periodo de análisis (2016 – 2020), además se identificaron los eventos reportados para la UPZ Chicó Lago de acuerdo con la información suministrada y corroborando mediante las coordenadas y la delimitación de dicha UPZ.

Luego, para la información seleccionada realizó un análisis en función los años y los meses para el periodo evaluado:



Figura 11. Registro de eventos de inundación mensual en la UPZ Chicó Lago para el periodo de registro

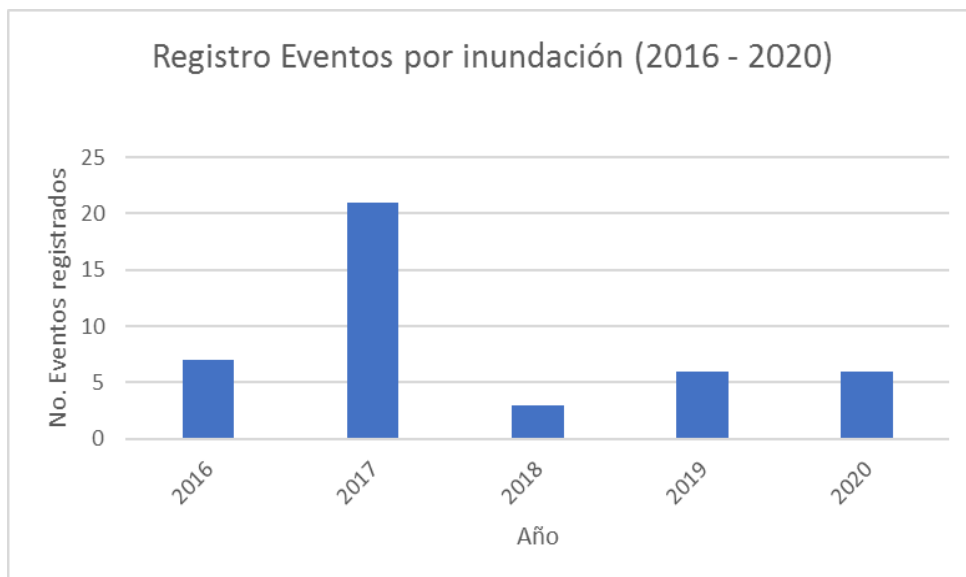


Figura 12. Registro de eventos de inundación anual en la UPZ Chicó Lago para el periodo de registro

Para el periodo evaluado los meses con mayor registro de inundaciones en la UPZ corresponden a marzo, mayo y noviembre (temporada de lluvias), a su vez, los meses donde no se presentaron registros son los que corresponden a los meses con menores precipitaciones históricamente. Se identificó que el año con mayores reportes es 2017 y con menores reportes es el 2018.

Se resalta que dos de los eventos de inundación evaluados se presentaron en fechas para las que los registros indican que no hubo lluvias en las estaciones de influencia en la UPZ. Estos eventos no fueron incorporados en los análisis puesto que el objeto es identificar las características de precipitación asociados a la

inundación. La ocurrencia de estos eventos puede obedecer a fallas en los reportes de las estaciones o afectaciones en el sistema de acueducto o la red de drenaje, es decir, el evento no está asociado a una precipitación y no fue generado por esta sino que corresponde a otras causas como las descritas anteriormente.

5.1.4 PROCESAMIENTO DE LOS EVENTOS DE LLUVIA

Para el procesamiento de información y determinación de las características más relevantes de los eventos de precipitación se utilizó el software RStudio por ser de libre acceso y contener los elementos necesarios para desarrollar este proyecto. Se utilizó el paquete IETD desarrollado por RStudio Team en el año 2020 (RStudio Team, 2020). El objetivo de esta herramienta es extraer de una serie de tiempo y datos de profundidad de precipitación además de las características de cada uno de los eventos. Estas características son determinadas a partir del método de definición de tiempo entre eventos, en inglés Inter-Event Time Definition, IETD (Jun *et al.* 2019).

Para determinar las características de la precipitación, se utilizó la función *drawre* que tiene como objeto extraer cada uno de los eventos de lluvia de una serie de tiempo sub-diaria. Así, se introdujo la hora y minuto (para el caso de este proyecto), la altura de precipitación en minutos para cada instante de tiempo definido. Adicionalmente fue necesario determinar el tiempo mínimo que se debe considerar para que se consideren eventos diferentes, para este proyecto se estableció un valor de una hora. Finalmente, aunque la función calcula las características de todos los eventos, únicamente muestra resultados para aquellos eventos donde al menos uno de los instantes de precipitación tenga como mínima una altura definida por el usuario. Así, se determinó un valor mínimo de 0.2mm, a partir del cual, la función buscará datos anteriores y posteriores con diferencias menores a una hora, los cuales serán acumulados para establecer las características de la precipitación mencionadas anteriormente.

Como resultado de este procedimiento se obtuvieron dos listados, el primero, detalla cada uno de los eventos mostrando los instantes de tiempo con su respectiva profundidad en milímetros. El segundo listado contiene las características de altura de precipitación en mm, duración en horas e intensidad promedio de la precipitación en mm por horas.

5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN CON LOS EVENTOS DE INUNDACIÓN

La regresión de Cox permite determinar de entre un grupo de variables si alguna de estas y cuales presentan una relación con un evento determinado mediante dos funciones, la primera, que es la función del riesgo la cual corresponde a la ocurrencia de un evento de inundación y la función de supervivencia, que es cuando

el evento de inundación no tiene lugar. En resumen, es posible predecir o analizar un comportamiento en función de otras variables o covariables.

Este modelo fue desarrollado en el ámbito biomédico con el fin de establecer la supervivencia o no de pacientes con cierta enfermedad, afectados por una o más condiciones. La finalidad en este caso es determinar si al tiempo de análisis (tiempo t) se presentaba el evento y que condiciones presentaban una tendencia cuando se daba el evento. Debido a la utilidad del modelo su uso se ha extendido a otros campos como la hidrología, logística de transportes, electrónica, entre otros. (Van Dijk, 2008).

El modelo de Cox está determinado por la función de riesgo:

$$h(t) = h_0(t) \times \exp(b_1x_1 + b_2x_2 + \dots b_px_p)$$

En donde,

x corresponde a las covariables, los coeficientes b , corresponden a la medición de la influencia de las covariables, es decir, los pesos de estas.

h_0 es el riesgo base, es decir, el riesgo de ocurrencia del evento cuando todas las variables son iguales a cero, haciendo que el componente exponencial de la función sea igual a 1.

t es el tiempo.

La expresión $b_1x_1 + b_2x_2 + \dots b_px_p$ es identificada comúnmente como puntaje de riesgo, ya a partir de esta se identifica el riesgo de las covariables. De esta manera, valores en extremo negativos corresponden a un riesgo menor que la media y valores en extremo positivos son riesgo más alto que la media.

Por otra parte, para la evaluación del riesgo proporcional, se tiene que:

$$\frac{h_i(t)}{h_j(t)} = \frac{h_0(t) \times \exp(b_{i1}x_{i1} + b_{i2}x_{i2} + \dots b_{ip}x_{ip})}{h_0(t) \times \exp(b_{j1}x_{j1} + b_{j2}x_{j2} + \dots b_{jp}x_{jp})} = \frac{\exp(b_{i1}x_{i1} + \dots b_{ip}x_{ip})}{\exp(b_{j1}x_{j1} + \dots b_{jp}x_{jp})}$$

Donde i y j corresponden a observaciones distintas, al tener igual riesgo base, el riesgo solo depende de la variación en alguna de las covariables, siendo los cocientes de las mismas constantes en el tiempo, el riesgo es proporcional (Molinero, 2004)

Para el análisis de la relación entre la precipitación y los eventos de inundación en la UPZ en estudio se emplearon los paquetes *survival* y *survminer*. Adicionalmente, se cuenta con el paquete *coxphw* que hace referencia a estimación ponderada de

la regresión de Cox, conocida también como regresión de riesgo proporcional, estimación de la tasa de riesgo promedio (RStudio Team, 2021).

Las características de esta función permite introducir variables obligatorias como tiempo, que corresponde desde el inicio hasta el momento en que ocurre el evento o finaliza el periodo de estudio, estatus, con el que se identifica si el evento ocurre o no para el tiempo determinado, y las demás variables explicativas para identificar las relaciones que se presentan entre estas y el evento presentado, es decir, se analizan otras características como factores que pueden afectar la ocurrencia del evento (Lalanne, 2016). En resumen se tienen las siguientes variables:

- Tiempo (de 1 a 365 días para el iésimo año evaluado)
- Grupo (Estatus o definición de la ocurrencia o no de un evento)
- Características (En este caso las características del evento de precipitación).

El grupo de observaciones en este caso corresponde a los eventos de precipitación. El estatus indica si para estos eventos ocurrió una inundación o no. Las características de la precipitación corresponden a profundidad de la precipitación, duración del evento e intensidad.

Dado que para el caso de la función en R se trata de riesgos proporcionales, se realizó la verificación de que las variables a analizar cumplieran esta condición, es decir, que la función de riesgo fuese independiente del tiempo y por lo tanto, la tasa de riesgo es constante. Para ello, se evaluó en cada una de las covariables los residuales de Schoenfeld en relación al tiempo con el fin de determinar si el riesgo de ocurrencia del evento no depende este. El procedimiento se llevó a cabo mediante la función `cox.zph()` para una respuesta en la que los residuales presenten un patrón respecto al tiempo, se evidencia que no se cumple con el supuesto de que los riesgos son proporcionales.

Así, las lluvias resultantes y sus características fueron asociados a los eventos de inundación y, posteriormente, evaluados mediante la regresión de Cox para buscar la relación entre estos.

Adicionalmente, se evaluó la influencia de la variabilidad climática en la ocurrencia de los eventos de inundación. Para esto se utilizaron los valores del Índice ONI de la NOAA. Este índice refleja las variaciones del patrón climático denominado El Niño Oscilación del Sur, mediante el cual se cuantifican las anomalías en la variación de la temperatura de la superficie del Océano respecto al valor promedio en el largo plazo (NOAA, 2021).

Tabla 1. Clasificación de los meses de ONI. Adaptado de (NOAA, 2021)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
2016	2.56	2.24	1.61	0.9	0.3	-0.03	-0.47	-0.57	-0.57	-0.74	-0.76	-0.5

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
2017	-0.43	-0.08	0.03	0.21	0.36	0.33	0.25	-0.16	-0.43	-0.56	-0.96	-0.99
2018	-0.98	-0.78	-0.8	-0.51	-0.2	0.05	0.12	0.09	0.47	0.9	0.9	0.89
2019	0.65	0.71	0.8	0.62	0.55	0.45	0.35	0.04	0.04	0.48	0.52	0.52
2020	0.6	0.37	0.48	0.36	-0.27	-0.34	-0.3	-0.59	-0.83	-1.25	-1.42	-1.15

En la tabla se presentan los valores del índice ONI, los cuales se han clasificado según la NOAA, en color rojo para los meses niño, en azul para los meses niña y los que se encuentran en negro corresponden a meses neutro. Se observa que para el año que presentó mayores inundaciones corresponde al 2017, año caracterizado por tener meses neutros y niña con un antecedente de meses niña del 2016.

Los resultados de la metodología descrita anteriormente se presentan a continuación.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se consolidan los resultados obtenidos.

En el siguiente apartado se analiza la relación entre los eventos de precipitación y la ocurrencia de inundaciones por encharcamiento en la UPZ Chicó Lago para un periodo de análisis entre los años 2016 y 2020. Para esto no solo se considera la altura de precipitación, sino que se analizan otras variables como duración del evento de lluvia e intensidad promedio de la precipitación.

De acuerdo con investigaciones realizadas alrededor del mundo, las inundaciones por encharcamiento pueden generar impactos de distinta magnitud y afectan primordialmente las zonas urbanas debido a los cambios en las características del suelo en las que, debido a un aumento de las áreas impermeables hay un aumento en la escurritía y una reducción del tiempo al pico, lo que en consecuencia favorece la acumulación de volúmenes de agua en zonas de la ciudad (Molina, 2016).

Para identificar las particularidades e influencia de otros fenómenos en los eventos de inundación, se analizó el periodo de registro, teniendo en cuenta que para el último año (2020) la condición de la pandemia pudo afectar la realización de reportes ante la entidad encargada debido a que siendo la vocación de la UPZ comercial y no habiendo comercios en funcionamiento ordinario pudieron disminuir los reportes por los eventos de inundación.

Inicialmente se evaluaron las variables de forma independiente para todo el periodo de registro, en relación con la ocurrencia del evento de inundación. Los resultados detallados se encuentran en el Anexo de este documento.

Previo a realizar las pruebas mediante el modelo de Cox se verificó la proporcionalidad de los riesgos, es decir, si la probabilidad de la ocurrencia del evento es dependiente o no del tiempo, para el modelo de regresión, el riesgo de ocurrencia del evento no depende del tiempo. Para la Profundidad, duración, intensidad y variabilidad climática se obtuvo lo siguiente:

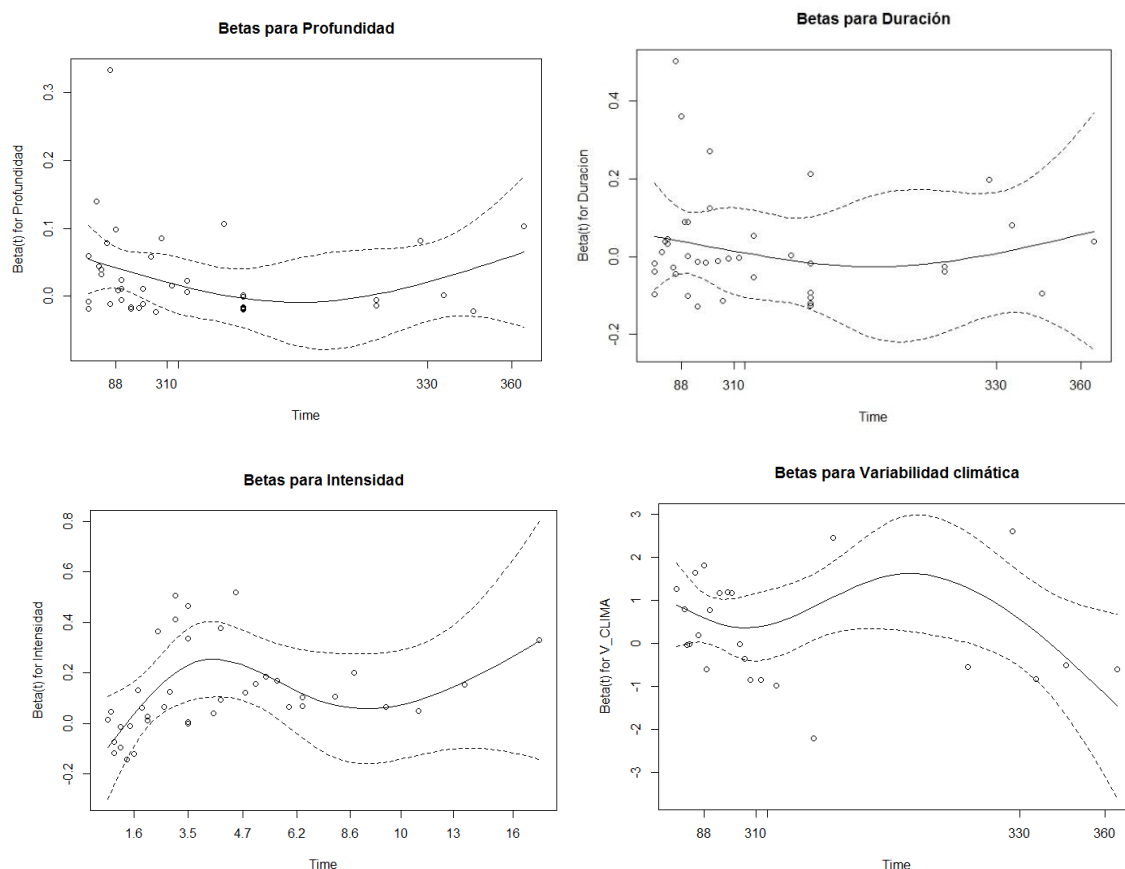


Figura 13. Betas para los parámetros de profundidad, intensidad, duración y Variabilidad Climática

A partir de la evaluación realizada se determinó que los parámetros cumplen con la condición de proporcionalidad de los riesgos, esto es, no se evidencia un patrón respecto al tiempo. Para el último caso, los valores del índice de variabilidad climática ONI reflejan una tendencia más marcada que los demás parámetros, lo anterior obedece a que, a través de los años, se ha ido evidenciando el calentamiento de la superficie de la tierra, con periodos de enfriamiento. Adicionalmente, al contar únicamente con valores mensuales para este parámetro se refleja una tendencia para el periodo de evaluación. Con el fin de contrarrestar esto se utilizó la variable como una estratificada, adoptando el valor de 1 los más elevados (Fase Niño), 2 para los intermedios (Neutro) y 3 para los valores más bajos del índice (Fase Niña).

De acuerdo con los parámetros evaluados en la regresión de Cox, se determinó que aunque todos presentan alguna significancia estadística los que mayor respuesta mostraron fueron la precipitación y los valores adoptados para el fenómeno del niño, tal como se ve en la siguiente tabla:

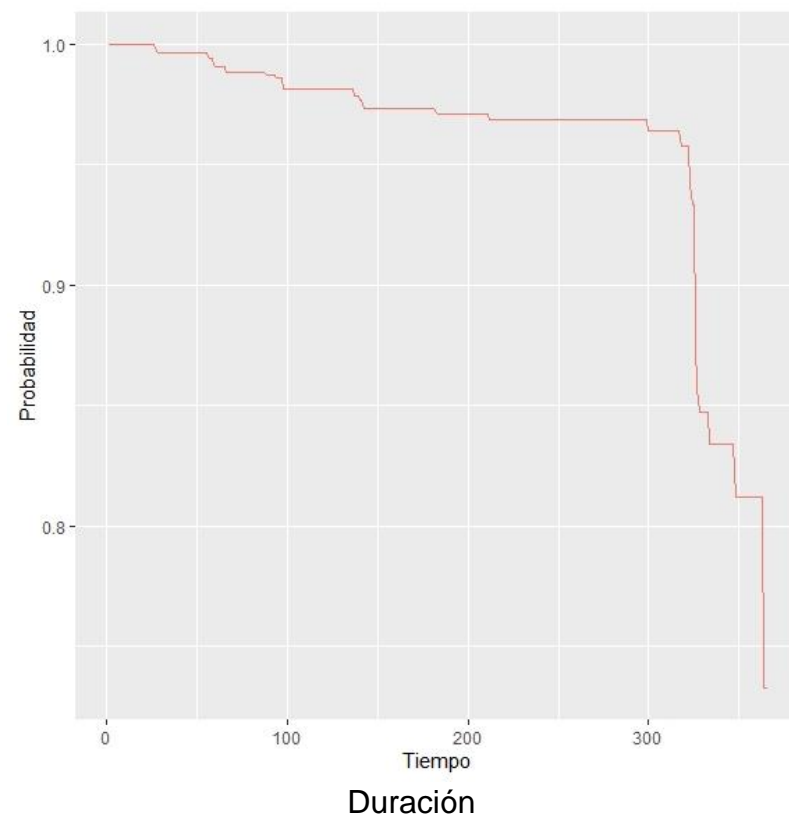
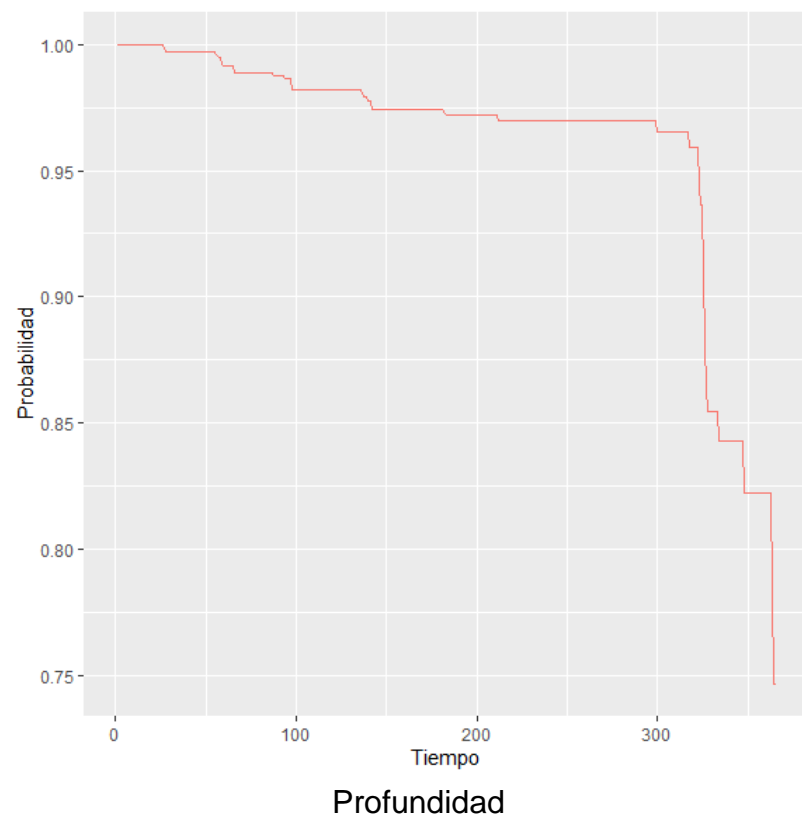
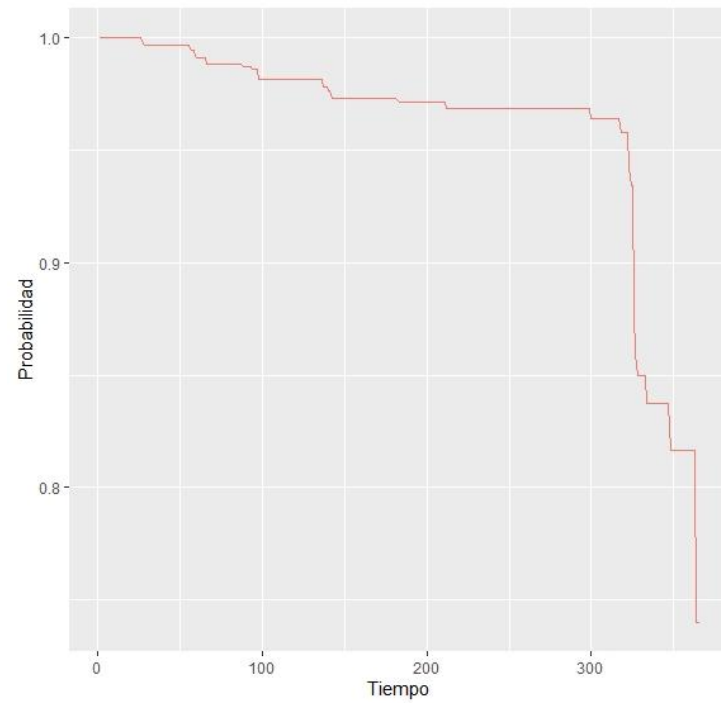
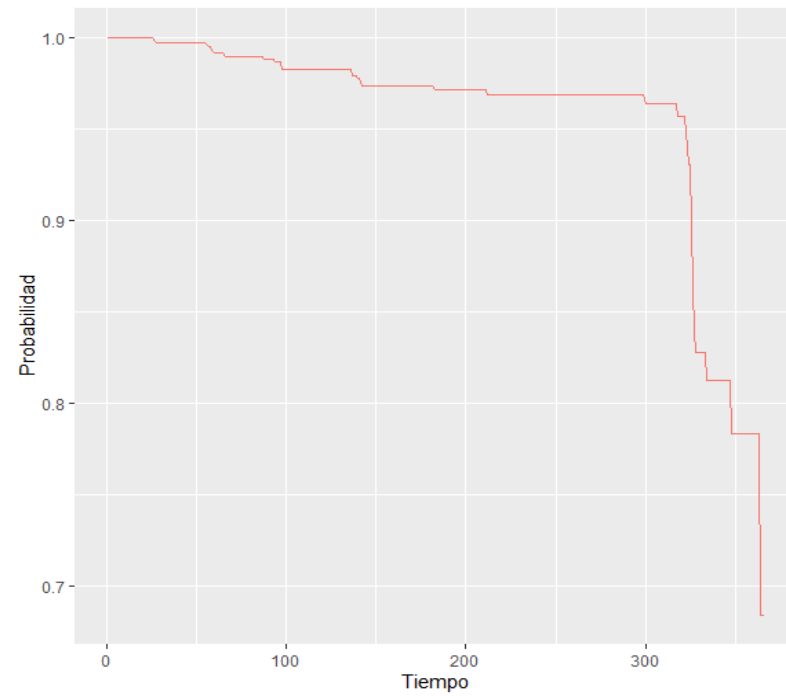


Figura 14. Curva de riesgo de supervivencia para parámetros de Profundidad y Duración



Intensidad



Índice de Variabilidad Climática

Figura 15. Curva de riesgo de supervivencia para parámetros de Intensidad e Índice de Variabilidad Climática

Como se observa en las figuras anteriores las variables analizadas de forma independiente muestran un aproximado a 1 (superior a 0.75) en relación al riesgo de supervivencia (No se presenta evento de inundación). Aunque se muestra una leve disminución hacia el final de la curva, la probabilidad de no ocurrencia (supervivencia) se mantiene alta.

Posteriormente se procedió a evaluar el modelo de Cox para el conjunto de covariables Profundidad, Duración, Intensidad e Índice de Variabilidad Climática.

```
Call:
coxph(formula = Surv(TIEMPO, Estatus == 1) ~ V_CLIMA + Profundidad +
+      Intensidad + Duracion, data = XDATOSCOX)
```

n= 945, number of events= 39

	coef	exp(coef)	se(coef)	z	Pr(> z)	
V_CLIMA	0.63114	1.87975	0.21976	2.872	0.00408	**
Profundidad	0.05251	1.05391	0.02320	2.263	0.02363	*
Intensidad	-0.13703	0.87194	0.12949	-1.058	0.28996	
Duracion	-0.04055	0.96026	0.04884	-0.830	0.40634	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

	exp(coef)	exp(-coef)	lower .95	upper .95
V_CLIMA	1.8797	0.5320	1.2219	2.892
Profundidad	1.0539	0.9488	1.0071	1.103
Intensidad	0.8719	1.1469	0.6765	1.124
Duracion	0.9603	1.0414	0.8726	1.057

Concordance= 0.717 (se = 0.036)

Likelihood ratio test= 14.22 on 4 df, p=0.007

Wald test = 18.52 on 4 df, p=0.001

Score (logrank) test = 18.86 on 4 df, p=8e-04

	chisq	df	p
V_CLIMA	0.401236	1	0.53
Profundidad	0.150132	1	0.70
Intensidad	0.000729	1	0.98
Duracion	0.172069	1	0.68
GLOBAL	0.741359	4	0.95

En este caso, se identificó que la profundidad en conjunto con el valor del índice de variabilidad climática, son las variables con mayor significancia estadística y sus valores de p son significativos (esto es menores a 0.05), seguido por la duración del evento que presenta una relación inversa o negativa, mientras que la intensidad no presenta una significancia estadística, para estas variables los valores de p son superiores a 0.05 por lo que no se consideran significativos en el modelo (López, 2011).

Adicionalmente, los intervalos de confianza incluyen el valor de 1, lo cual indica que estas variables aportan pobremente a la tasa de riesgos, por lo que Adicionalmente, de acuerdo con los criterios de evaluación del modelo mediante los test Likelihood ratio test, Wald test y Score (logrank) test, el valor de p es cercano a cero, por lo tanto significativo, lo que se traduce en que el modelo es significativo.

A partir de esto se evidencia que para las condiciones evaluadas de cada uno de los parámetros, no se presenta una clara relación entre la duración de la lluvia y su intensidad en relación a un evento de inundación. Así se observan tendencias para los parámetros de profundidad, que puede ser explicado únicamente mediante el Índice de Variabilidad Climática.

Estos resultados son concordantes con lo analizado por Mallakpour (2017), en cuyo estudio se observó que los eventos extremos de precipitación pueden ser únicamente explicados mediante los Índices de Variabilidad Climática y que según el índice empleado, la probabilidad de ocurrencia del evento se asociaba positiva o negativamente. considera en su análisis que es la profundidad y las variables climáticas las condicionantes para la ocurrencia de eventos de inundación.

Luego, a partir de esto, se realiza un ajuste adicional para considerar en el modelo únicamente las variables más significativas, con lo que se obtienen los siguientes resultados.

```
Call:
coxph(formula = Surv(TIEMPO, Estatus == 1) ~ V_CLIMA +
  Profundidad,
      data = XDATOSCOX)

n= 945, number of events= 39

              coef exp(coef) se(coef)      z Pr(>|z|)
V_CLIMA      0.63146   1.88035  0.21926  2.880  0.00398 **
Profundidad  0.02859   1.02901  0.01082  2.643  0.00821 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

	exp(coef)	exp(-coef)	lower .95	upper .95
V_CLIMA	1.880	0.5318	1.224	2.890
Profundidad	1.029	0.9718	1.007	1.051

Concordance= 0.708 (se = 0.038)

Likelihood ratio test= 12.69 on 2 df, p=0.002

Wald test = 15.27 on 2 df, p=5e-04

Score (logrank) test = 15.41 on 2 df, p=5e-04

	chisq	df	p
V_CLIMA	0.387	1	0.53
Profundidad	0.375	1	0.54
GLOBAL	0.843	2	0.66

De igual forma, los resultados obtenidos de los tests muestran que la tasa de riesgos es proporcional, por lo que para esta condición se valida nuevamente el modelo.

Se observa a partir de los resultados obtenidos que aunque la profundidad de la precipitación indica que este parámetro es significativo para el modelo, al ser cercano a cero implica que tiene menor incidencia que el Índice de variabilidad climática.

A partir de estos resultados se realizaron histogramas de frecuencia para determinar las profundidades asociadas a eventos de inundación. De esta forma se encontró que las profundidades asociadas a los eventos de inundación se encuentran principalmente entre 0.27mm y 5.82mm siendo los valores mínimos y máximos de 0.27mm y 69.68mm, respectivamente.

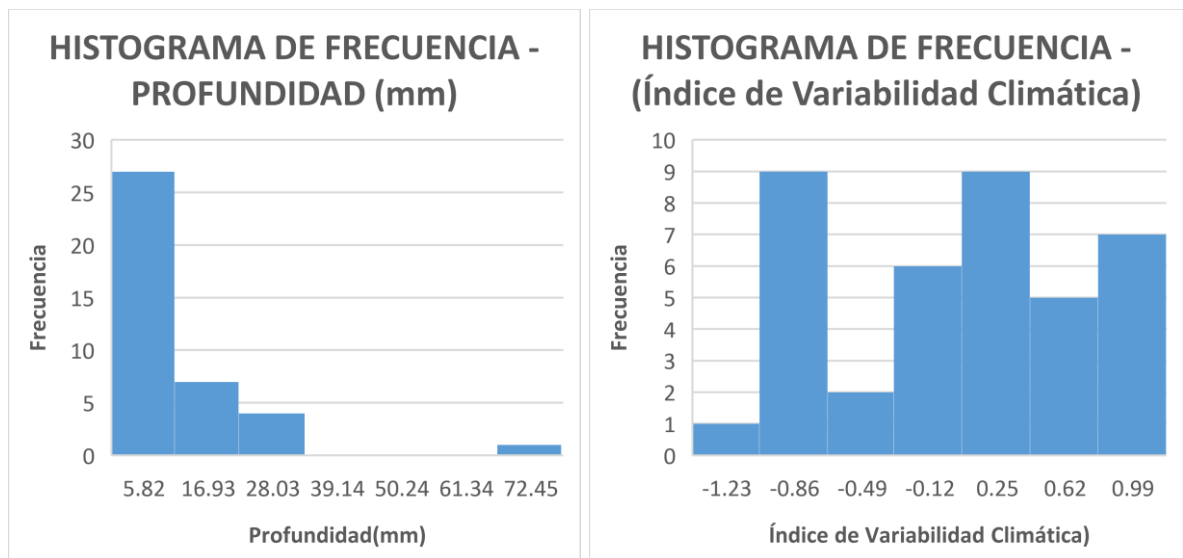


Figura 16. Histograma de frecuencia para parámetros de profundidad y Variabilidad Climática asociados a eventos de inundación

Para el caso de la variabilidad climática, los valores observados no reflejan una tendencia para ocurrencia de los eventos de inundación. Con el fin de conocer el comportamiento de los demás parámetros asociados a los eventos de inundación, a continuación se presentan los histogramas de frecuencia para la intensidad y duración:

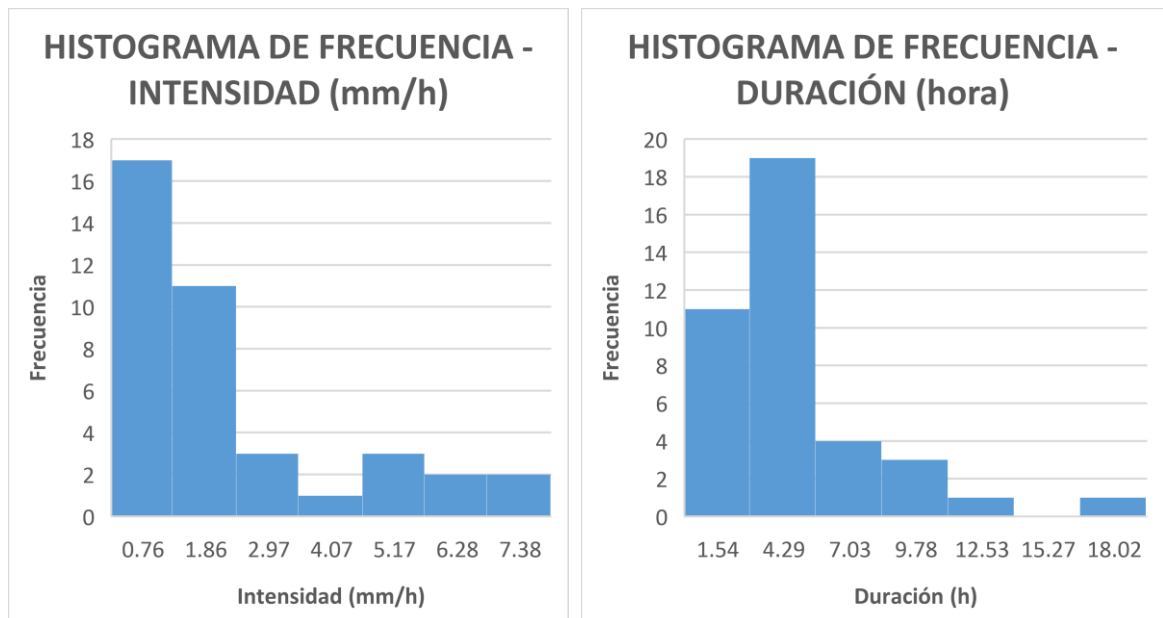


Figura 17. Histograma de frecuencia para parámetros de intensidad y duración asociados a eventos de inundación

De igual forma que en el caso de la profundidad, la intensidad de lluvia y la duración

asociados a eventos de inundación se presentan para los valores más bajos de estos. Por esto, se realizó una inspección visual de los datos para determinar si se observa una tendencia de los datos para los casos en los que se presentan inundaciones en relación a los casos en los que no se presentan estos eventos, para lo cual se obtiene lo siguiente:

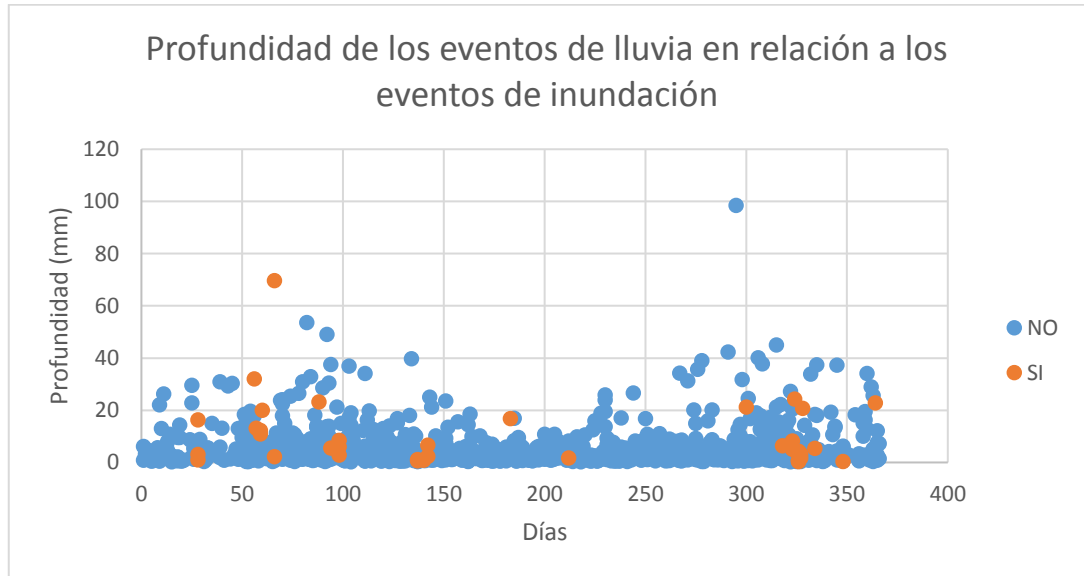


Figura 18 Profundidad de los eventos de lluvia para el periodo de registro según se registraron inundaciones o no

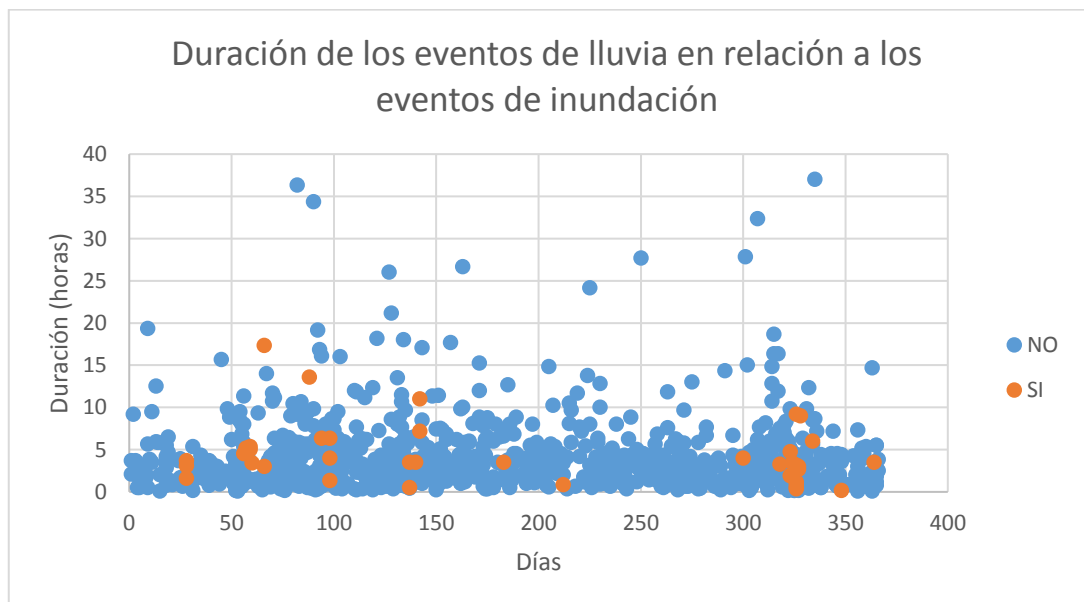


Figura 19 Duración de los eventos de lluvia para el periodo de registro según se registraron inundaciones o no

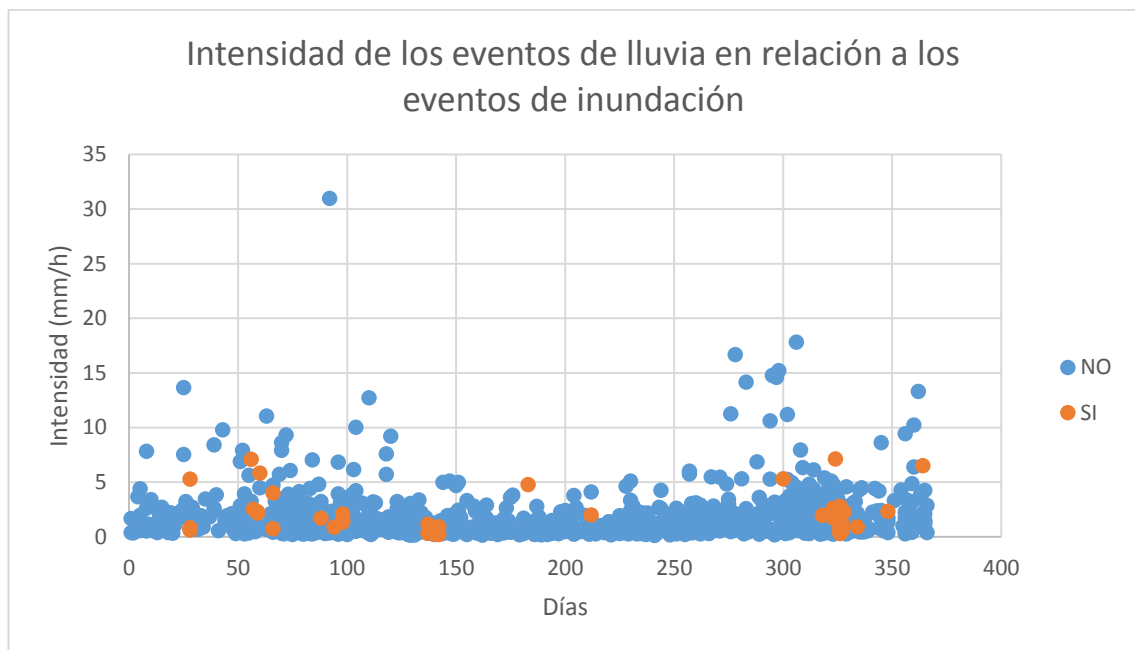


Figura 20 Intensidad de los eventos de lluvia para el periodo de registro según se registraron inundaciones o no

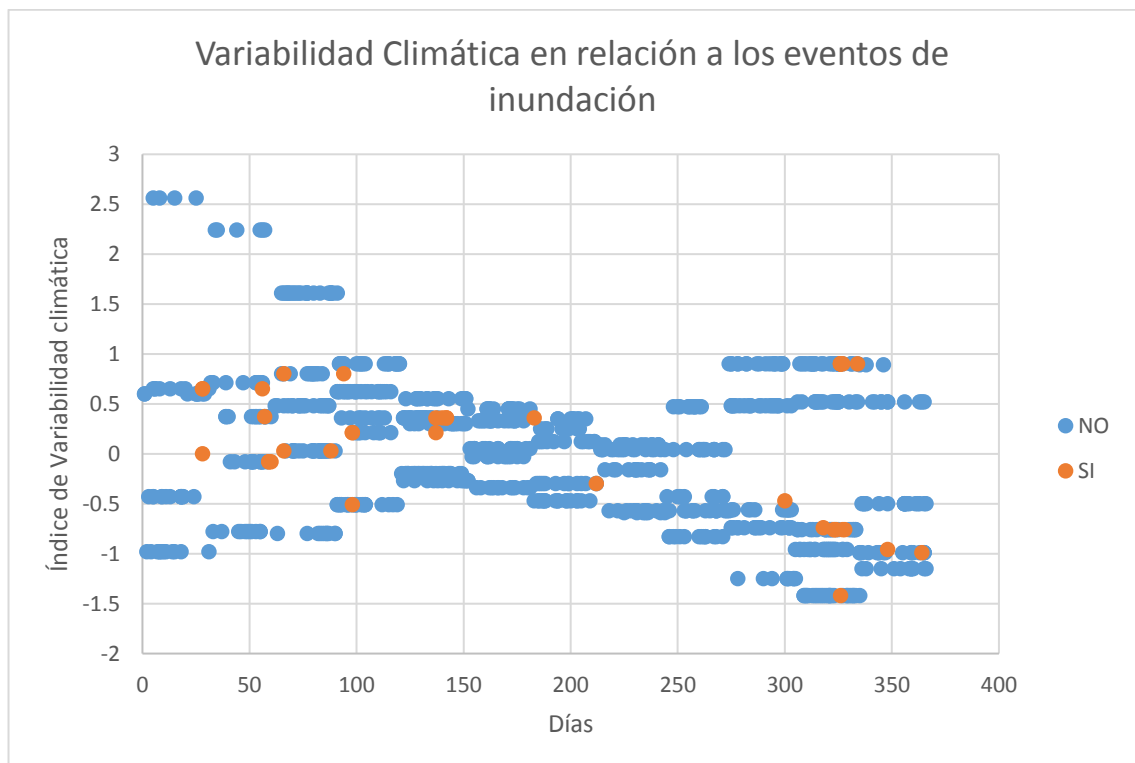


Figura 21 Índice de variabilidad climática para el periodo de registro según se registraron inundaciones o no

Como se observa en las figuras anteriores, para los diferentes parámetros no se evidencia una tendencia que diferencie los datos asociados a los eventos de

inundación, únicamente el Índice de Variabilidad Climática empleado muestra que para la primera mitad del año los eventos de inundación se asocian a los periodos neutros principalmente (valores positivos menores a 1), mientras que para la segunda mitad del año, estos se asocian a periodos niña principalmente (Valores negativos).

De las evaluaciones realizadas anteriormente se concluye que mediante la metodología utilizada y las variables analizadas no son suficientes para establecer una relación con la ocurrencia de inundaciones. Lo anterior puede deberse a que en este estudio no se consideraron factores como el estado y cambios en el sistema de drenaje, esto como variable adicional puede modificar los resultados esperados para el análisis realizado.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se consolidan los resultados obtenidos.

Se identificaron 945 eventos de precipitación para el periodo de registro (2016 – 2020) siendo el 2017 año con mayor cantidad de eventos y el 2018 con menor cantidad de eventos. Esta diferencia entre años consecutivos puede explicarse considerando que después del 2017, a raíz de los eventos presentados, se realizaron mejoras o programas de mantenimiento en el sistema de drenaje de la ciudad.

De igual forma, para el periodo consultado se presentaron 39 eventos de inundación que pudieron asociarse con precipitaciones, presentándose en su mayoría para los meses de Mayo y Noviembre, los cuales coinciden con los meses del régimen bimodal en las estaciones de interés.

Aunque se contó con una cantidad de observaciones importante (945) se considera oportuno realizar una evaluación con un mayor número de registros que permita establecer una tendencia para las demás características de la precipitación, que se puedan asociar a los eventos de inundación.

A partir del proceso de Cox fue posible establecer la existencia de una relación entre los parámetros de profundidad e Índice de Variabilidad Climática utilizado, sin embargo, para los otros parámetros no fue posible determinar una relación con la ocurrencia de los eventos de inundación. A pesar de lo anterior, la metodología y variables consideradas para el estudio no suficientes para obtener resultados concluyentes sobre los valores asociados a los eventos de inundación.

Para futuros estudios se debe considerar los cambios en las condiciones de la red de drenaje a partir de intervenciones importantes en la misma o mantenimiento, pueden influenciar en la ocurrencia de eventos de inundación

Se recomienda complementar la información de los eventos de inundación, obteniendo de los mismos la altura de la lámina de agua y la extensión, de manera tal que se consideren aspectos adicionales a los reportes realizados por terceros.

8 BIBLIOGRAFÍA

BREUGEM, A., WESSELING, J., OOSTINDIE, C., y RITSEMA, C. Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. En *Earth – Science Reviews*. Mayo, 2020, vol. 204, p. 1-46.

CHEN, Albert., DJORDJEVIC, Slobodan., DRAGAN, Savic. y LEANDRO, J. An analysis of the combined consequences of pluvial and fluvial flooding. En *Water Science & Technology*. Octubre, 2010.

CONSEJO LOCAL de GESTIÓN del RIESGO y CAMBIO CLIMÁTICO. Localidad No. 2 Chapinero. Caracterización General de Escenarios de Riesgo. {En línea}. {11 septiembre de 2020} disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/220605/255251/Identificaci%C3%B3n+y+Priorizaci%C3%B3n.pdf/aad77368-a272-47d3-8ce6-31f28eb35c34>. Febrero, 2018.

HOUSTON, Donald., WERRITTY, Alan., BASSETT, David., HOOLACHAN, Andrew. y MCMILLAN, Marion. Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: The invisible hazard. En Joseph Rowntree Foundation. Noviembre, 2011.

DI SALVO, Cristina. CIOTOLI, Giancarlo. PENNICA, Francesco. CAVINATO, Gian. Rainstorm height and floodings effect analysis for pluvial flood emergency management. EN. *Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards* (18-19, Noviembre: Padua, Italia).

EL TIEMPO. Acueducto construye túnel para evitar inundaciones en Barrios Unidos {En línea}. {6 septiembre de 2020} disponible en: <https://www.eltiempo.com/bogota/tunel-para-evitar-inundaciones-en-teusaquillo-y-barrios-unidos-292626>.

EL TIEMPO. Los sistemas de drenaje sostenibles avanzan en Bogotá. 2020. {En línea}. {11 septiembre de 2020} disponible en: <https://www.eltiempo.com/bogota/como-funcionan-los-sistemas-de-drenaje-sostenibles-en-bogota-498810>.

IDIGER. Operación de las redes de monitoreo. TICS-PD-11. 2018. {En línea}. {02 abril de 2021} disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/979603/TICS-PD-11+Operaci%C3%B3n+de+redes+de+monitoreo.pdf/1149e9e2-b2fd-4398-9d18-5a561189006f>

IDIGER. Caracterización General del Escenario de Riesgo por Inundación. {En línea}. {02 septiembre de 2020} disponible en: <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>.

IDIGER. Caracterización Climatológica de Bogotá, Como un Aporte al Fortalecimiento de la Red Hidrometeorológica de Bogotá (RHB). Contrato No. 431 de 2019. 2019. disponible en: <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>

IWA/IAHR INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE (18, septiembre, 2017: Praga, República Checa). Real – time prediction of pluvial floods and induced water contamination. IWA/IAHR, 2017. p. 620-628

JUN, .C QIN, X., LU, W. Temporal Pattern Analysis of Rainstorm Events for Supporting Rainfall Design in a Tropical City. _En: Green Energy and Technology. 2019. p. 380 – 384.

LALANNE, Christophe., MESBAH, Mounir., 7 - Survival data Analysis. Biostatistics and Computer-based Analysis of Health Data using R. Elsevier. 2016, p. 137-154.

LÓPEZ, Antonio. Comparación de dos Modelos de Regresión en Fiabilidad. Universidad de Granada. 2011. {En línea}. {13 abril de 2021} disponible en: <https://masteres.ugr.es/moea/pages/tfm1011/comparaciondedosmodelosderegresionenfiabilidad/>.

MALLAKPOUR, Iman., VILLARINI, Gabriele., JONES, Michael. y SMITH, James. On the use of Cox regression to examine the temporal clustering of flooding and heavy precipitation across the central United States. En: Global and Planetary Change. Agosto, 2017, vol. 155, p. 98-108.

GAITAN, S., VAN DE GEISEN, NC., TEN VELDHUIS, JAE. Can urban pluvial flooding be predicted by open spatial data and weather data?. En: Environmental Modelling & Software. 2016, vol. 85, p. 156-171.

MOLINA, Luis. Resiliencia a inundaciones: nuevo paradigma para el diseño urbano. En: Revista de Arquitectura. 2016. Volumen 18, p. 82-94.

MOLINERO, Luis. Verificación de los modelos de supervivencia de Cox. En: Sociedad Española de Hipertensión - Liga Española para la lucha contra la hipertensión arterial. 2004. P7.

NOAA, National weather Service. What is ENSO?. {En línea}. {10 octubre de 2020} disponible en: <https://www.weather.gov/mhx/ensowhat>.

NOAA Climate Prediction Center, May 2021 ENSO update: bye for now, La Niña!. {En línea}. {13 mayo de 2021} disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/may-2021-enso-update-bye-now-la-ni%C3%B1a>.

OMM. Manual sobre predicción y avisos de crecidas. Génova. Edición 2011. 152 p.

(ISBN 978-92-63-31072-9)

PADILLA, Manuel., GÓNIMA, Leonardo. Desarrollo de una metodología para el estudio de las inundaciones causadas por encharcamiento de agua lluvia en zonas urbanas relativamente planas. Área de estudio: Montería (Colombia). En: Estudios Geográficos. Junio, 2015, vol. LXXV, p. 265-284.

RYAN, Barbara. Establishing information seeking pathway in slow and flash floods. En: International Journal of Disaster Risk Reduction. Octubre, 2018, vol. 31, p. 9-19

ROJAS, Claudia., DE MEULDER, Bruno., SHANNON, Kelly. Water urbanism in Bogotá. Exploring the potentials of an interplay between settlement patterns and water management. En: Habitat International. Agosto, 2015. Volumen 48, p. 177-187.

RStudio Team. (2016). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

SALDARRIAGA, Juan., SALCEDO, Camilo., SOLARTE, Laura., PULGARÍN, Laura., RIVERA, María., CAMACHO, Mariana., IGLESIAS, Pedro., MARTINEZ, Francisco., CUNHA, María. Reducing Flood Risk in Changing Environments: Optimal Location and Sizing of Stormwater Tanks Considering Climate Change. En: Water, vol. 12. 2020.

SÖRENSEN, Johanna. MOBINI, Shifteh. Pluvial, urban flood mechanisms and characteristics – Assessment based on insurance claims. En: Journal of Hydrology. 2017, Vol. 555. p. 51-67.

TORRES, Andrés., GALARZA, Sandra., y MOLINA, Luis. Bogotá, una ciudad sensible al agua: elementos de reflexión. En: Cuadernos De Vivienda Y Urbanismo. Abril, 2019. Volumen 12, Número 23.

UNGRD. Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Junio, 2019. {En línea}. {20 octubre de 2020} disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/124190/452620/UNGRD.pdf/da3d1282-d547-4701-bb53-26bb1944bf83>

RStudio Team. Package 'survival'. Abril 2021. {En línea}. {26 abril de 2021} disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf>

RStudio Team, IETD. Marzo 2020. {En línea}. {10 febrero de 2021} disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/IETD/IETD.pdf>

VELANDIA, Julio. La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. 2014.

WAN MOHTAR, Hanna., ABDULLAH, Jazuri., ABDUL, Khairul. y MUHAMMAD, Nur Shazwani. Urban flash flood index base don historical rainfall events. En: Sustainable Cities and Society. 2020, vol. 56.

WANG, Xiuquan., KINSLAND, Gary., POUDEL, Durga y FENECH, Adam. Urban flood prediction under heavy precipitation. En Journal of Hydrology. Octubre, 2019, vol. 577.

VAN DIJK, Paul., JAGER, Kitty., ZWINDERMAN, Aeilko., ZOCCALI, Carmine., DEKKER, Friedo. The analysis of survival data in nephrology: basic concepts and methods of Cox regression. En: Kidney International. 2008, vol. 74, p. 705-709.

9 ANEXO